

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc.dr.sc. Stephan Škorić

Tomislav Srbić

Zagreb, 2009



SAŽETAK

Suvremeni obradni procesi vođeni novom proizvodnom filozofijom teže ka cilju što bolje proizvodnosti, ekonomičnosti te što boljoj kakvoći proizvoda. Istraživači vođeni ovim ciljevima su primorani razmišljati na način stalnog unaprjeđenja i razvitka procesa obrade.

Koristeći do tada stečena znanja i smjernice proizvodne filozofije znanstvenici su došli na ideju kombiniranja principa tokarenja i glodanja iz čega je nastao novi postupak obrade rezanjem, namijenjen za obradu okruglih i zakrivljenih površina, okretno glodanje. Uz znatne prednosti nad tokarenjem i glodanjem postupak okretnog glodanja je dobio vrlo brzo primjenu u praksi, naročito kod glomaznih obradaka koji zbog svojih dimenzija i oblika ne dozvoljavaju upotrebu visokih frekvencija obrade, što je neekonomično. Postupci okretnog glodanja, u ovom radu predstavljenog ortogonalnog, na kojeg se i odnosi daljni tekst, još ni dan danas nisu u potpunosti istraženi. Usprkos ovim saznanjima, postupak ortogonalnog okretnog glodanja, već na osnovi do sada obavljenih istraživanja preporuča se široj primjeni i zamjeni tokarenja gdje god je to moguće. Kao što je već navedeno postupak nije sustavno istražen, a to je vjerojatno i razlog njegove, značajno ograničene primjene. Isto tako nisu razvijeni ni definirani pouzdani matematički modeli, namijenjeni optimizaciji i što boljem nadzoru samog procesa obrade.

Zbog uvida u nedostatak istraživanja o ovoj metodi obrade i jasno viđenih prednosti nad tokarenjem postoji smisao i potreba za daljnjim istraživanjem. Cilj ovog završnog rada je sistematizacija dosadašnjih spoznaja, kao i ukazanje na potrebu za daljnji razvoj ovog postupka obrade.



SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEMELJI NASTANKA OKRETNOG GLODANJA I GLAVNE SPOZNAJE	3
2.1. Vrste okretnog glodanja	4
2.2. Prednosti i nedostaci okretnog glodanja	6
2.3. Usporedba s tokarenjem	7
3. ORTOGONALNO OKRETNO GLODANJE	8
3.1. Kinematika i dinamika procesa	8
3.1.1. Osjetljivost na vibracije	12
3.1.2. Presjek odvojene čestice	13
4. GEOMETRIJA OBRADENE POVRŠINE	15
5. REZNI ALATI ZA ORTOGONALNO OKRETNO GLODANJE	18
6. ODVOJENA ČESTICA	23
6.1. Izgled odvojene čestice kod tokarenja	24
6.2. Izgled odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja	25
7. POSTOJANOST ALATA KOD ORTOGONALNOG OKRETNOG GLODANJA ...	26
8. PROIZVODNOST POSTUPKA OBRADE	28
8.1. Proizvodnost kod tokarenja	28
8.2. Proizvodnost kod ortogonalnog okretnog glodanja	28
9. PRIMJENA I STROJEVI	30
10. ZAKLJUČAK	37
11. LITERATURA	38



POPIS SLIKA

Slika 2.1. Tokarenje [3]

Slika 2.2. Glodanje [4]

Slika 2.3. Koaksijalno i ortogonalno okretno glodanje [1]

Slika 3.1. Mogućnosti postizanja aksijalnog posmaka u ovisnosti o poziciji postupka, odnosno ekscentriteta [1][6]

Slika 3.2. Pozicije (varijante) ortogonalnog okretnog glodanja [1]

Slika 3.3. Odnosi zahvata glodala i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja [1]

Slika 3.4. Shematski prikaz brzina kod ortogonalnog okretnog glodanja [1][6]

Slika 3.5. Presjek odvojene čestice kod ekscentričnog okretnog glodanja [1][6]

Slika 3.6. Shematski prikaz glavne sile rezanja i njenih komponenti kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja [1][6]

Slika 3.7. Prikaz promjene sile rezanja u ovisnosti o promjeni zahvatnog kuta [6]

Slika 4.1. Izgled površine nakon obrade postupkom ortogonalnog okretnog glodanja [11]

Slika 4.2. Shematski prikaz geometrije obrađene površine [1]

Slika 5.1. Glodalo iz standardnog programa za ortogonalno okretno glodanje [1]

Slika 5.2. Glodalo iz specijalnog programa za finu obradu O.O.G. [1]

Slika 5.3. Prikaz materijala reznih pločica [2]

Slika 5.4. Glodalo za koaksijalno okretno glodanje [11]

Slika 5.5. Glodala za ortogonalno okretno glodanje [11]

Slika 5.6. Glodala za ortogonalno okretno glodanje proizvođača SECO, sa pločicama od tvrdog metala [13]

Slika 5.7. Glodalo proizvođača Sandvik Coromant (Tip: CoroMill 390 cutter) [14]

Slika 5.8. Prikaz raznih operacija istim alatom [14]

Slika 6.1. Oblici odvojenih čestica kod tokarenja [16]

Slika 6.2. Iomljena i segmentna (nekontinuirana) [2]

Slika 6.3. Kontinuirana O.O.Č [2]



- Slika 6.4. Teorijski i stvarni oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja [1]
- Slika 7.1. Ovisnost istrošenja stražnje površine alata o duljini obrade jedne oštrice u smjeru glavnog gibanja [1]
- Slika 7.2. Istrošenost alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okretnim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [1]
- Slika 8.1. Indeks pogodnosti za proizvodnost ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja i tokarenja [1]
- Slika 9.1. Obrada koljenaste osovine ortogonalnim okretnim glodanjem [1]
- Slika 9.2. Obrada koljenaste osovine CNC obradnim centrom [18]
- Slika 9.3. Gruba obrada tlačnog cilindra [1]
- Slika 9.4. Gruba obrada koljenaste osovine [19]
- Slika 9.5. Glodanje zavojnice [19]
- Slika 9.6. Glodanje osovine različitih promjera [19]
- Slika 9.7. Tokarski stroj preuređen za ortogonalno okretno glodanje [1]
- Slika 9.8. Ortogonalno okretno glodanje na CNC glodalici [1]
- Slika 9.9. CNC obradni centar proizvođača Mori Seiki [20]
- Slika 8.10. Prikaz glavnih i pomoćnih osi stroja sa slike 9.9. [20]
- Slika 9.11. Primjer kompletne obrade na CNC obradnom centru [1]
- Slika 8.12. Glomazna koljenasta osovina izrađena ortogonalnim okretnim glodanjem [20]



POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba postupaka obrade [5]

Tablica 2. Istrošenost alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okretnim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [1]



POPIS OZNAKA

Oznaka,	Jedinica,	Značenje
A	[mm ²]	presjek odvojene čestice
A _{ob}	[mm ²]	presjek obodnog obreska odvojene čestice
A _{če}	[mm ²]	presjek čeonog obreska odvojene čestice
D _g	[mm]	promjer glodala
D _o	[mm]	promjer obratka
E	[mm]	razmak osi alata i obratka (ekscentar)
F _c	[N]	glavna sila rezanja
F _{c,če}	[N]	čeaona komponenta glavne sile rezanja
F _{c,ob}	[N]	obodna komponenta glavne sile rezanja
I _p		indeks pogodnosti
L _f	[m]	put glodanja u posmičnom smjeru
L _{Vc}	[m]	put glodanja u smjeru glavne brzine rezanja
P	[mm]	prepust glodala preko osi alata
R _a	[μm]	srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti
R _g	[mm]	radijus glodala
R _T	[μm]	teorijska visina neravnina, teorijska hrapavost
R _t	[μm]	maksimalno rastojanje između najvišeg brijega i najnižeg dola profila hrapavosti
T	[min]	trajnost alata
VB	[mm]	širina pojasa istrošenja stražnje površine alata
V _M	[mm ³]	volumen materijala pretvoren u odvojenu česticu
V _{oč}	[mm ³]	volumen koji zauzimaju odvojene čestice
W _T	[μm]	teorijska valovitost
a _e	[mm]	širina zahvata glodala i obratka
a(φ)	[mm]	visina obodnog obreska, trenutna dubina obrade



a_p	[mm]	dubina obrade
$b_{\check{c}}$	[mm]	širina čeonog obreska odvojene čestice
η	[°]	kut zavojnice (između obodne i aksijalne posmične brzine)
Υ	[°]	kut prednje površine alata
f	[mm]	posmak po okretaju obratka, kod tokarenja
f_{ax}	[mm]	aksijalni posmak po okretaju obratka kod OOG
f_z	[mm]	posmak po zubu glodala
f_{zo}	[mm]	posmak po zubu glodala u smjeru obodne posmične brzine
φ	[°]	zahvatni kut glodala (kut rotacije glodala)
$h_{\check{c}}$	[mm]	debljina čeonog obreska odvojene čestice
h_e	[mm]	debljina čeonog obreska
h_o	[mm]	debljina obodnog obreska odvojene čestice
i_n		omjer frekvencije vrtnje glodala i obratka
$k_{o\check{c}}$		volumenski koeficijent odvojene čestice
κ_r	[°]	kut namještanja oštrice alata
l_s	[mm]	duljina oštrice alata
n_g	[min ⁻¹]	frekvencija vrtnje glodala
n_o	[min ⁻¹]	frekvencija vrtnje obratka
ψ	[°]	kut rotacije obratka
r_{ϵ}	[mm]	radijus vrha alata
r_s	[mm]	radijus zakrivljenja čeone oštrice
t_g	[min]	strojno vrijeme obrade
v_c	[m min ⁻¹]	brzina rezanja
v_e	[m min ⁻¹]	ukupna brzina rezanja
v_f	[m min ⁻¹]	ukupna posmična brzina
v_{fo}	[m min ⁻¹]	obodna posmična brzina
v_{fax}	[m min ⁻¹]	aksijalna posmična brzina
Z_g		broj zubi glodala



IZJAVA

Izjavljujem da sam Završni rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, te znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Ovom prilikom zahvaljujem se doc.dr.sc. Stephanu Škoriću na stručnoj pomoći, strpljenju i mnogim korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svima ostalima na pruženoj pomoći u izradi ovog Završnog rada.

I na kraju se zahvaljujem obitelji i prijateljima za pruženu potporu tijekom dosadašnjeg studija.

Tomislav Srbić



1. UVOD

Sve većim razvitkom svjetsko tržište se suočava sa brzim i neprestanim promjenama, koje su vidljive u dinamici raznovrsne ponude novih raznovrsnih proizvoda, brzom zastarijevanju sadašnjih i novih proizvoda, visokim zahtjevima kupca za kvalitetom i specifičnim zahtjevima za pojedina regionalna tržišta. Zadani niz uvjeta prilično je težak za klasičnu industrijsku proizvodnju stoga su se morale poduzeti odgovarajuće mjere:

- povećanje produktivnosti, smanjenje troškova proizvodnje,
- skraćanje protoka kroz proizvodnju uz poboljšanje kvalitete proizvoda, uvjeta rada i života uopće.

Prodorom znanosti, novih obradnih postupaka, novih materijala obradaka i novih materijala alata, posebno informatike, u neposrednu proizvodnju dolazi do ostvarivanja novog načina proizvodnje u kojem dominiraju računala, kako u pripremno poslovnoj, tako i u izvršnoj fazi proizvodnog procesa, koja je automatizirana do računalom integrirane proizvodnje. Ne radi se više o novom pristupu proizvodnji, već o novoj proizvodnoj filozofiji koja otvara nove vidike, postavlja nove ciljeve i pruža nova sredstva za njihovo ostvarivanje, čime se stvaraju goleme mogućnosti za zadovoljavanje potreba tržišta za industrijskim proizvodima. Tržištu industrijske robe pristupa se sa globalnog stajališta, prvenstveno sa ciljem stvaranja velikog obujma proizvodnje širokog asortimana radi zadovoljavanja želja korisnika. Uvjetno rečeno, razdoblje 1980-85. može se smatrati granicom između klasične, inače vrlo razvijene proizvodnje i nove proizvodne filozofije. U razvoju proizvodnje sa bitno novim karakteristikama prepoznaju se četiri faze: stvaranje suvremenog svjetskog tržišta, koje uvjetuje ostvarivanje suvremene proizvodnje na principima nove proizvodne filozofije, koja pak rezultira krajnjim ciljem ostvarivanja proizvodnje Just-in-Time. Nova proizvodna filozofija pretpostavlja [1]:

- uvođenje novih obradnih postupaka, novih materijala obradaka i alata u proizvodni proces, koje rezultira istodobno golemim povećanjem proizvodnosti rada, poboljšanjem kvalitete proizvoda i snižavanjem troškova proizvodnje,
- nultu kontrolu kvalitete,



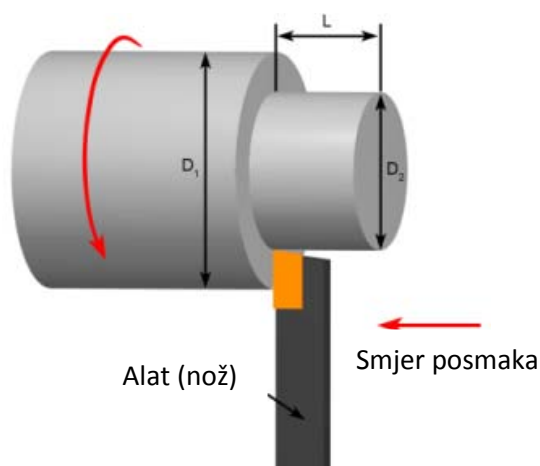
- netroškovni princip u određivanju cijene industrijskog proizvoda, prema kojemu je cijena konstantna a dobit se ostvaruje snižavanjem troškova proizvodnje.

U skladu s tim cilj svakog postupka obrade je realizirati izlaz kvalitetnije, brže i ekonomičnije. Standardizacija i modularni koncept obradnih sustava, te novi postupci obrade su načini reduciranja cijene proizvodnje i povećanja kvalitete proizvoda . Osobita kombinacija i sažetak različitih postupaka na jednom stroju je vrlo uspješan i ekonomičan put koji puno obećava. Ortogonalno okretno glodanje predstavlja jednu takvu kombinaciju jedan novi postupak suvremene obrade rotacijskih površina[1].

2. TEMELJI NASTANKA OKRETNOG GLODANJA I GLAVNE SPOZNAJE

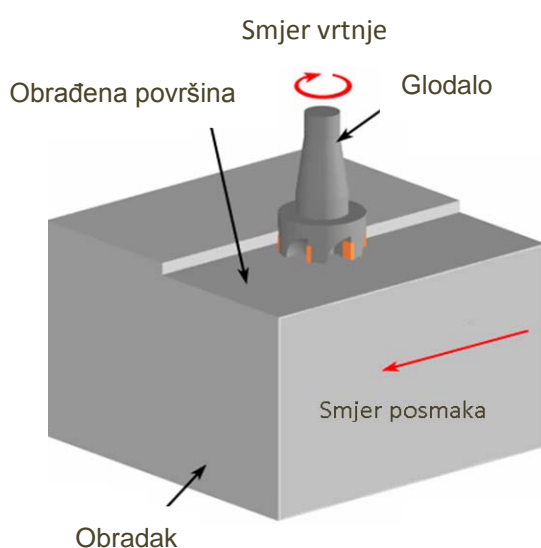
Tokarenje i glodanje se koriste dugi niz godina i pokazali su se ka jedni od glavnih postupaka obrade rezanja u strojarskoj praksi.

Definicija postupka glasi: Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površina [2].



Slika 2.1. Tokarenje [3]

Definicija postupka glasi: Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) obradnih površina proizvoljnih oblika [2].



Slika 2.2. Glodanje [4]



Prije nego što se došlo do samog razvoja okretnog glodanja, u razvoju ostalih konvencionalnih obradnih postupaka razmišljalo se na sljedeći način: za povećanje produktivnosti obrade ravnih površina umjesto jednog noža (blanjanje) korišten je višerezni alat (glodalo) pa je iz toga proizašao postupak glodanja. Takav način razmišljanja bio je smjernica i kod obrade rotacionih površina pa se iz toga razvio postupak okretnog glodanja [1].

Kombinacija različitih postupaka obrade na jednom stroju postala je sve značajnija razvojem novih filozofija i CNC fleksibilnih obradnih centara. Okretno glodanje (eng. **Turn-Milling**) predstavlja jednu od tih kombinacija.

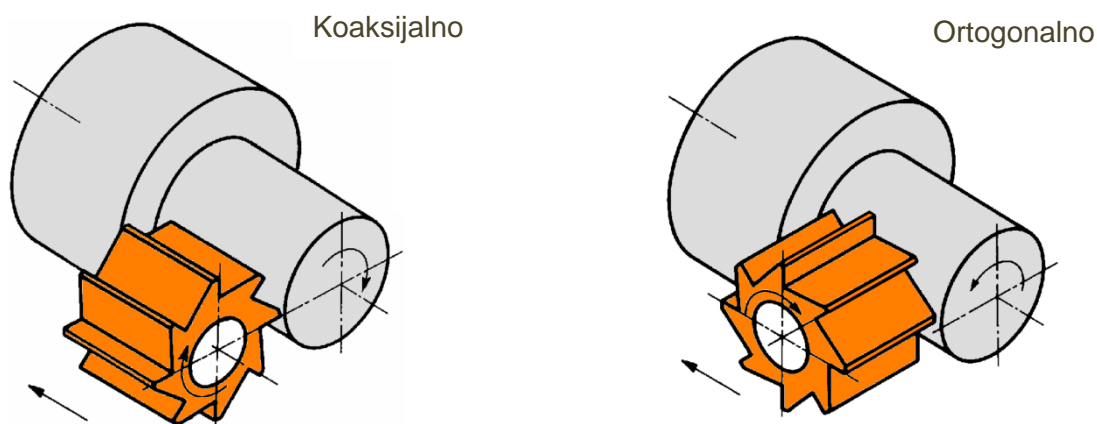
Okretno glodanje (Turn-Milling) jest postupak odvajanja čestica koji se dobio kombinacijom tokarenja i glodanja kada se u procesu tokarenja umjesto tokarskog noža stavi glodalo sa vlastitim prignonom. Pri tome frekvencija vrtnje glodala može biti manja ili veća od frekvencije vrtnje obratka.) [1].

Okretnim glodanjem se općenito obrađuju rotirajući obratci sa zakrivljenim (okruglim ili neokruglim) obradnim površinama [1].

2.1. Vrste okretnog glodanja

Prema međusobnom položaju osi alata i obratka, razvijene su dvije osnovne vrste okretnog glodanja, prikazane na slici 2.3.

- koaksijalno okretno glodanje,
- ortogonalno okretno glodanje.



Slika 2.3. Koaksijalno i ortogonalno okretno glodanje [1]



Koaksijalno okretno glodanje je glodanje kod kojega su osi alata i obratka međusobno paralelne. Pri tomu razlikujemo obradu vanjskih i unutarnjih površina glodalom koje ima rezne oštrice postavljene po vanjskom obodu glodala. Rezne oštrice mogu biti postavljene i u unutarnjoj površini glodala pa se često u praksi takvo glodanje naziva i obilazno okretno glodanje. Ortogonalno okretno glodanje je glodanje kod kojega su osi alata i obratka međusobno okomite.

Ortogonalno okretno glodanje postupak je obrade odvajanjem čestica relativno novijeg datuma i njegova istraživanja intenzivirala su se osamdesetih godina prošlog stoljeća. Istraživanja ortogonalnog okretnog glodanja počela su, praktično, na Institutu za proizvodne tehnike i alatne strojeve VTŠ Darmstadt od strane Sorgea i Ecksteina. Nešto kasnije istraživanja su intenzivirana u Laboratoriju za alatne strojeve RWTH Aachen u kooperaciji sa proizvođačima alatnih strojeva. Iz navedenih razloga postupak nije još našao svoje mjesto u standardima. 1990. godine prvi puta se u jednoj knjizi, vrlo šturo, pojavljuje ortogonalno okretno glodanje kao zaseban postupak, pod već uobičajenim nazivom "Drehfrasen". König smatra i predlaže ortogonalno okretno glodanje kao poseban postupak, eventualno kao podskup navojnog glodanja [1].

Analizom brojnih objavljenih radova provedenih istraživanja procesa ortogonalnog okretnog glodanja, uočava se da je, nakon razvoja osnovnih pojmova i značajki postupka, akcent dan na razvoj strojeva, što je uvjetovano zahtjevima proizvođača alatnih strojeva. Željelo se odmah postupak primijeniti na proizvodnju glomaznih obradaka neuravnoteženih masa i na taj način bitno povećati produktivnost njihove proizvodnje. Optimiranje postupka, odnosno određivanje matematičkih zakonitosti tijeka procesa obrade, nije se posebno istraživalo. Prema dostupnoj literaturi, utjecaj parametara režima obrade na hrapavost obrađene površine također nije dovoljno istražen, a njihov utjecaj nije matematički opisan. Pri proizvodnji uglavnom su korištene spoznaje iz područja klasičnog glodanja. U radu [1] autor piše: "Iako se Drehfrasen u praksi primjenjuje, do danas nedostaju temeljna istraživanja te nove tehnologije".



2.2. Prednosti i nedostaci okretnog glodanja

Prednosti [5]:

- Smanjenje sila rezanja doprinosi boljoj dimenzijskoj točnosti, te točnosti oblika.
- Manje trošenje alata (veća postojanost).
- Uslijed relativno male frekvencije vrtnje obratka smanjena je mogućnost deformacije uslijed centrifugalnih sila (pri obradi neuravnoteženih i velikih obradaka).
- Mogućnost hlađenja alata i odvođenje topline sa strugotinom smanjuje temperaturu obratka, što doprinosi manjim deformacijama obratka i većom točnosti.
- Kratka odvojena čestica koja nastaje nije problematična s gledišta njezinog odvođenja (osobito značajno za CNC obradne centre).
- Visoka kvaliteta obrađene površine omogućava izbjegavanje operacije brušenja, a time i smanjenje vremena i troškova obrade.
- Omogućena obrada složenih oblika u jednom stezanju.

Nedostaci [5] :

- U cilju postizanja visoke kvalitete i proizvodnosti (za iskorištenje prednosti ortogonalnog okretnog glodanja) nužno je potrebno upravljanje s četiri osi. Stoga je postupak primjenjiv za CNC obradne centre.
- Postupak je vrlo osjetljiv na vibracije što može dovesti do nestabilnosti postupka koja se očituje u netočnosti obrade i lošijoj kvaliteti obrađene površine. Stoga stroj, a posebno glodača jedinka moraju biti što krući, s mogućnošću prigušenja vibracija. Potrebno je osigurati da je što više reznih oštrica istovremeno u zahvatu.



2.3. Usporedba s tokarenjem

- Visoka produktivnost → moguće je skinuti 1,2 do 4 puta veću količinu odvojene čestice u jedinici vremena zavisno o broju zubi glodala [5].
- Dobra kvaliteta obrađene površine → pri istim ostalim uvjetima u pravilu je bolja nego kod tokarenja ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) [5].
- Manji utrošak snage → većina snage potrebna za odvijanje procesa se troši na okretanje glodala jer je to glavno gibanje. To je naročito važno kod obradaka većih dimenzija kod kojih bi obrada tokarenjem iziskivala potrošnju znatno veće snage [5].
- Mogućnost ostvarivanja viših brzina rezanja od tokarenja → prilikom tokarenja obradaka velikih dimenzija i nesimetričnih masa (veliki valjci, rotor, ekscentar osovine, koljenasta vratila, itd.), kod povećanih frekvencija vrtnje javljaju se vibracije i centrifugalne sile koje uzrokuju elastične deformacije obratka. Posljedice su smanjena točnost obrade i povećana hrapavost obrađene površine [5].

	TOKARENJE	GLODANJE	OKRETNO GLODANJE
Glavno gibanje	Rotacijsko: obradak	Rotacijsko: alat	Rotacijsko: alat
Posmično gibanje	Pravocrtno: alat	Pravocrtno: obradak	Rotacijsko: obradak Pravocrtno: alat
Varijante	Uzdužno, Poprečno	Obodno, Čeono	Koaksijalno Ortogonalno
Duljina odvojene čestice	Manje brzine: lomljena Veće brzine: neprekinuta	Kratka	Kratka
Sile rezanja	Kontinuirane	Promjenjive	Promjenjive
Presjek odvojene čestice	Stalan	Promjenjiv	Promjenjiv

Tablica 1. Usporedba postupaka obrade [5]

3. ORTOGONALNO OKRETNO GLODANJE

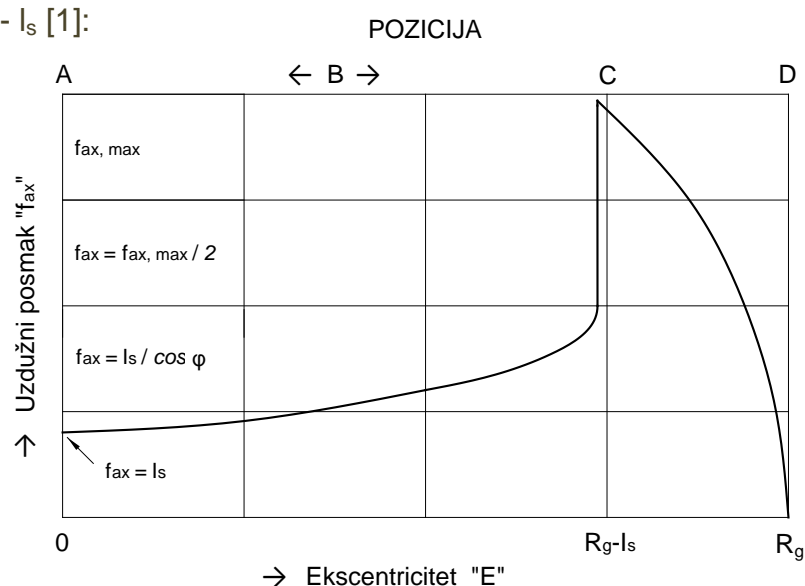
3.1. Kinematika i dinamika procesa

Ortogonalno okretno glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg se kombiniranjem principa postupaka tokarenja i glodanja dobivaju općenito cilindrične (okrugle i neokrugle) obradne površine. Prema tome, ortogonalno okretno glodanje se dobije kada se u procesu tokarenja tokarski nož zamjeni glodalom, tako da su osi glodala i obratka međusobno okomite [1].

Prema međusobnom položaju osi alata i obratka, odnosno veličini razmaka među osima (ekscentricitetu "E") razlikuje se centrično i ekscentrično ortogonalno okretno glodanje, odnosno četiri osnovne pozicije (varijante) postupka, kako je to prikazano slikom 3.2. [1]:

- Pozicija **A** → $E = 0$, .
- Pozicija **B** → $0 < E < (R_g - l_s)$, .
- Pozicija **C** → $E = R_g - l_s$, .
- Pozicija **D** → $E = R_g$.

Prema slikama 3.1. i 3.2. maksimalna vrijednost aksijalnog posmaka koja se može postići definirana je duljinom čeonice oštice (l_s) i veličinom osnovnog razmaka (ekscentriteta-E). Kod centričnog ortogonalnog okretnog glodanja aksijalni posmak maksimalno može biti koliko je čeonica dugačka. Međutim, kod osnovnog razmaka $R_g > E > 0$ posmak može biti znatno veći i to nekoliko puta, a maksimalan je za osni razmak $E = R_g - l_s$ [1]:



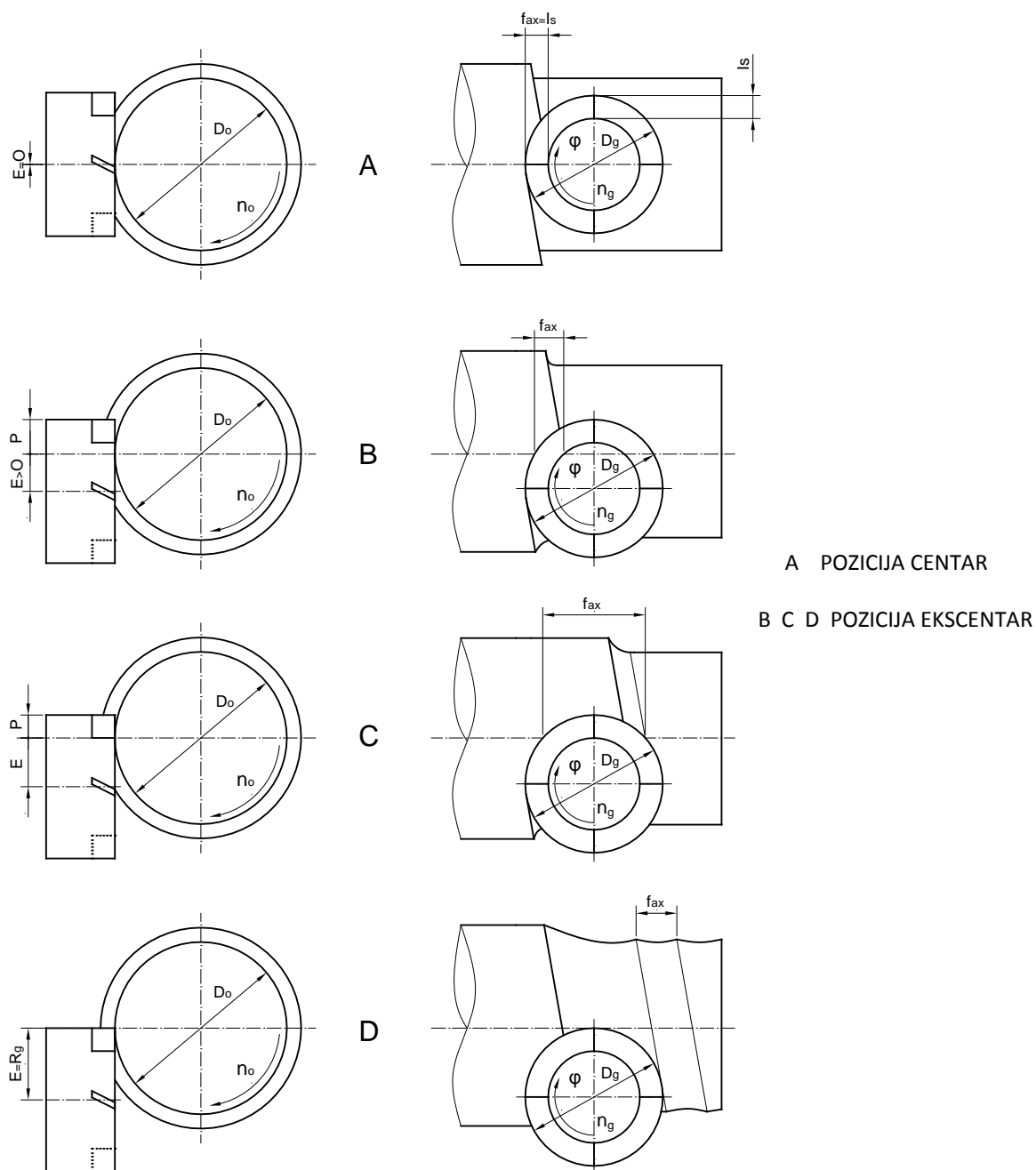
Slika 3.1. Mogućnosti postizanja aksijalnog posmaka u ovisnosti o poziciji postupka, odnosno ekscentriteta [1][6]

$$f_{ax,max} = 2\sqrt{R_g^2 - (R_g - I_s)^2} \quad 3.1.$$

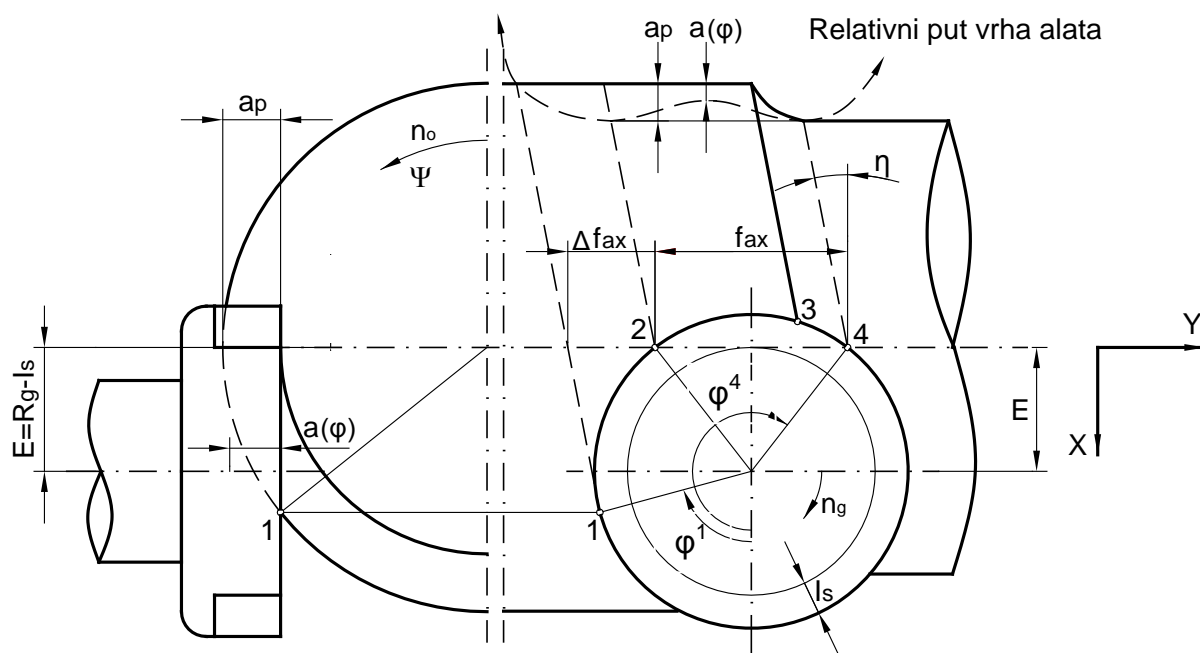
Kako rezne pločice imaju uglavnom radijus (r_ϵ) vrijedi izraz

$$f_{ax,max} = 2\sqrt{\left(R_g - r_\epsilon \tan \frac{\kappa_r}{2}\right)^2 - E^2} \quad 3.2.$$

Pozicija D, pri osnom razmaku $E = R_g$, predstavlja granični slučaj, kada pri bilo kojem aksijalnom posmaku nastaju teorijske neravnine na obrađenoj površini u aksijalnom smjeru obratka. Time je taj postupak neprikladan za uporabu.



Slika 3.2. Pozicije (varijante) ortogonalnog okretnog glodanja [1]



Slika 3.3. Odnosi zahvata glodala i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja [1].

U točki 1 počinje zahvat obodne oštrice glodala i obratka (tu je dubina rezanja jednaka nuli). U točki 2 dubina rezanja je maksimalna, sve manji rad obavlja obodna oštrica, a u rad se uključuje i čeona oštrica. Od točke 2 dubina rezanja se najprije malo smanjuje pa onda povećava da bi u točki 4 nastupio izlaz iz zahvata. Zbog ovakve karakteristične putanje alata obrada je bez izrazitih udarnih opterećenja i vibracija za razliku od ravninskog čeonog glodanja. Istraživanja su pokazala da se udarna opterećenja na reznoj oštrici i vibracije bitno smanjuju kada se glodalu u odnosu na obradak poveća osni razmak E (kontakt između glodala i obratka je duži, više je zubi u zahvatu što rezultira mirnijim radom i boljom kvalitetom obrađene površine). Također, za razliku od oštrice tokarskog noža koja radi kontinuirano na željenom promjeru obratka, kod ortogonalnog okretnog glodanja rezne oštrice se primiču i odmiču od obrađivane površine [5].



Kinematski gledano ortogonalno okretno glodanje također može biti [1]:

- $\mathbf{n}_g \ll \mathbf{n}_o$ - kada glavno rotaciono gibanje izvodi obradak, a glodalo izvodi posmično rotaciono gibanje. Postupak je, za sada, ostao samo u sferi eksperimentalnih istraživanja.
- $\mathbf{n}_g \gg \mathbf{n}_o$ - kada glavno rotaciono gibanje izvodi glodalo, a obradak izvodi rotaciono posmično gibanje. Na tom načinu ortogonalnog okretnog glodanja provedeno je najviše istraživanja, te je ujedno i najčešće primijenjen u praksi.

Potrebno je naglasiti da obrada zakrivljenih i kuglastih površina višeosnim simultanim upravljanjem na CNC glodalici ili obradnom centru ostavlja oblik obrađene površine istovjetan onome kod ortogonalnog okretnog glodanja. Ovdje obradak ne obavlja rotaciono gibanje već se kružno posmično gibanje alata (ili obratka) ostvaruje simultanim upravljanjem po više osi [1][7]. Stoga se ovaj način glodanja također može smatrati kinematski specijalnim slučajem ortogonalnih okretnih glodanja.

Kinematski proces ortogonalnog okretnog glodanja vrlo je složen. Pri tome se, prije svega, misli na to da se dijagram brzina mijenja tijekom zahvata oštrice glodala i obratka, a mijenjaju se također i kinematski kutovi obradnog klina. Prikaz brzina za centrično ortogonalno okretno glodanje, kada brzina rezne oštrice ima maksimalan iznos, dan je na slici 3.4. Vidi se da postoje dvije posmične brzine:

- obodna posmična brzina obratka " v_{fo} " i
- aksijalna posmična brzina obratka ili alata " v_{fax} ".

Prema smjerovima vektora brzina u točki zahvata, također, postupak može biti istosmjerni ili protusmjerni.

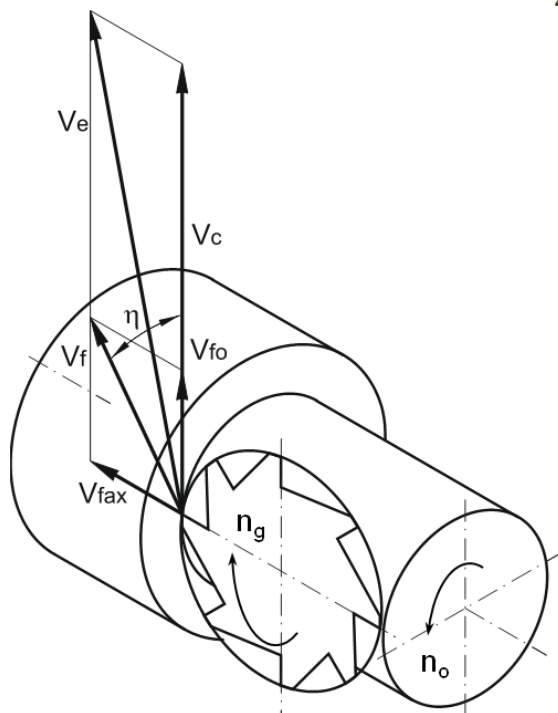
Prema slici 3.4. ukupna (efektivna) brzina obrade jednaka je vektorskom zbroju svih brzina [1] [6]:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_{fo} + \vec{v}_{fax} = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad 3.3.$$

a ukupna posmična brzina

$$v_f = \sqrt{v_{fo}^2 + v_{fax}^2} = f_z z_g n_g \rightarrow \text{pri tome je } v_{fo} \gg v_{fax} \quad 3.4.$$

Za pojedine brzine vrijede slijedeće relacije



$$v_c = D_g \pi n_g \quad 3.5.$$

$$v_{fo} = f_{zo} z_g n_g = D_o \pi n_o \quad 3.6.$$

$$v_{fax} = f_{ax} n_o \quad 3.7.$$

$$i_n = \frac{n_g}{n_o} = \frac{D_o \pi}{f_{zo} z_g} \quad 3.8.$$

$$f_{zo} = \frac{D_o \pi n_o}{z_g n_g} \quad 3.9.$$

Slika 3.4. Shematski prikaz brzina kod ortogonalnog okretnog glodanja [1][6]

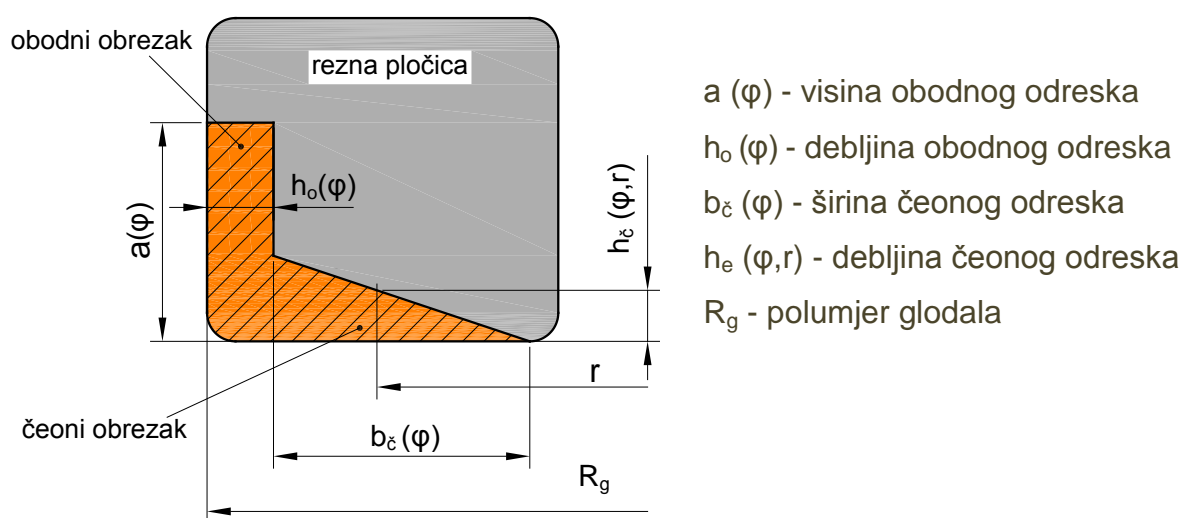
3.1.1. Osjetljivost na vibracije

Prema autorima [6][8][9][10], specifična kinematika ortogonalnog okretnog glodanja čini taj postupak naročito osjetljivim na vibracije. U sustavu stroj-alat-obradak kao dinamički najslabija komponenta pokazala se glodača jedinka. Vibracije iz ovog izvora mogu biti predane drugim dijelovima sustava i vratiti se, čineći pri tome zatvorenu petlju. Nadalje, jako je važno da se pogonskom i steznom sustavu obratka omogući pogon s konstantnim momentom i što višim stupnjem prigušenja. Navodi se nekoliko izvora vibracija:

- promjena debljine odvojene čestice tijekom zahvata (slike 3.4. i 3.5.) klasičan je razlog zbog kojeg se pojavljuju samouzbuđene vibracije,
- rezna pločica, barem jedna, koja ima čeonu oštricu paralelnu osi obratka ($\kappa_r=0^\circ$) ima za posljedicu drugačiju reznu geometriju od drugih pločica i drugačiji presjek odvojene čestice,
- stalna promjena smjera i veličine brzine rezanja i sile rezanja tijekom zahvata.

U navedenim radovima navedeni su rezultati mjerenja vibracija. Kao najutjecajniji parametar obrade označena je brzina rezanja. Međutim valja uzeti u obzir formule 3.5. do 3.9. koje pokazuju zavisnost brzine rezanja o frekvencijama vrtnje alata i obratka. Povećanjem brzine rezanja, tako, povećava se i frekvencija vrtnje alata, ali i frekvencija vrtnje obratka koja se označava kao bitna komponenta krutosti sustava.

3.1.2. Presjek odvojene čestice



Slika 3.5. Presjek odvojene čestice kod ekscentričnog okretnog glodanja [1][6]

Kinematski složeni proces ortogonalnog okretnog glodanja ima za posljedicu i karakterističan presjek odvojene čestice (slika 3.5.), koji se neprestano mijenja tijekom zahvata, odnosno vremena. Uz konstantne sve uvjete obrade presjek odvojene čestice je tako funkcija zahvatnog kuta " φ ". Na taj način neprestano se mijenja smjer i veličina vektora sile rezanja (slika 3.6 i 3.7.), što otežava njen izračun. Proučavanjem sila rezanja kod ortogonalnog okretnog glodanja bavili su se autori u radovima [1] i [6] i predložili izraze za njen izračun. Presjek odvojene čestice, prema slici 3.5., sastoji se od dva dijela:

- dijela koji stvara obodna oštrica, obodni odrezak: $A_{ob} = a(\varphi) h_o(\varphi)$
- dijela koji stvara čeona oštrica, čeonni odrezak: $A_{ce} = b_c(\varphi) h_c(\varphi, r)/2$.

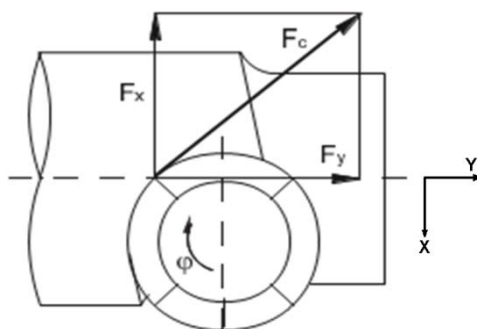
S obzirom na navedeno i glavna sila se sastoji od dva dijela:

$$F_c = F_{c,ob} + F_{c,}, \quad 3.10.$$

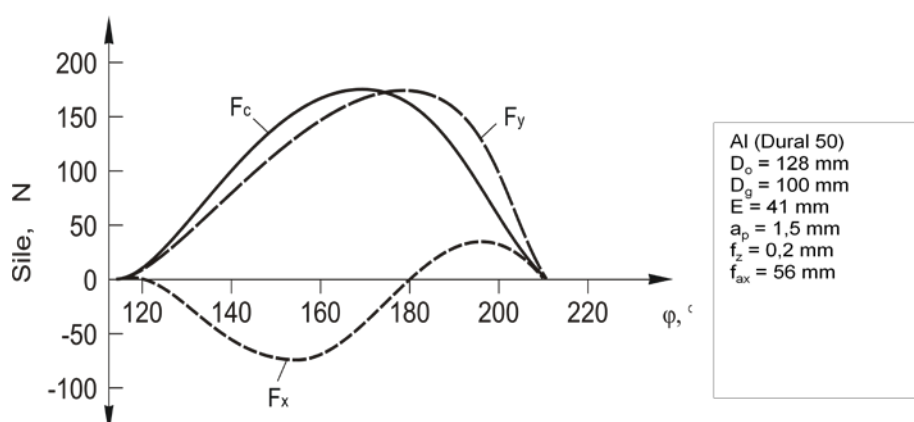
$$F_{c,ob}(\varphi) = k_{c1.1} a(\varphi) h_o(\varphi)^{1-m_c} \quad 3.11.$$

$$F_{c,}(\varphi) = \int_{r(\varphi)} dF_{c,}(\varphi, r) = k_{c1.1} \int_{r(\varphi)} h(\varphi, r) h_b(\varphi)^{1-m_c} dr \quad 3.12.$$

Na slici 3.6. prikazana je glavna sila rezanja i njezine komponente kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja. Potrebno je naglasiti da se smjer komponenata mijenja ovisno o zahvatnom kutu glodala. Slika 3.7. prikazuje promjenu sile rezanja prilikom obrade obratka, materijala Al (Dural 50), ovisno o zahvatnom kutu glodala kod ortogonalnog okretnog glodanja. Zadani parametri obrade su prikazani na slici.



Slika 3.6. Shematski prikaz glavne sile rezanja i njenih komponenti kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja [1][6]

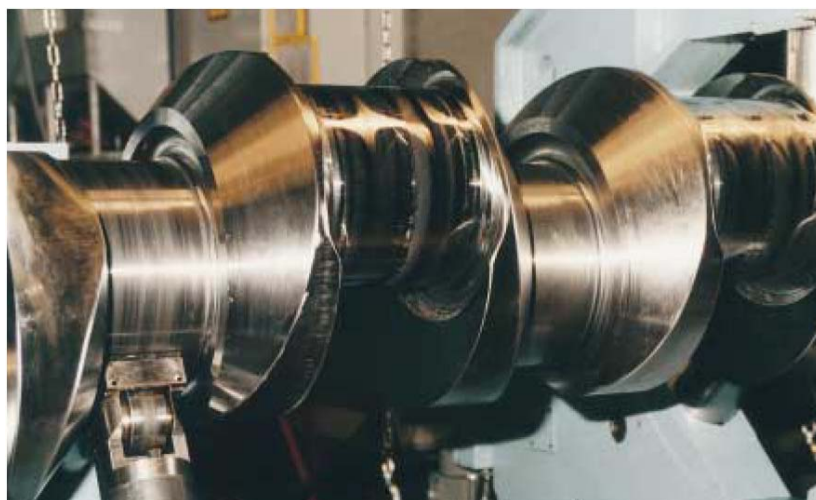


Slika 3.7. Prikaz promjene sile rezanja u ovisnosti o promjeni zahvatnog kuta [6]

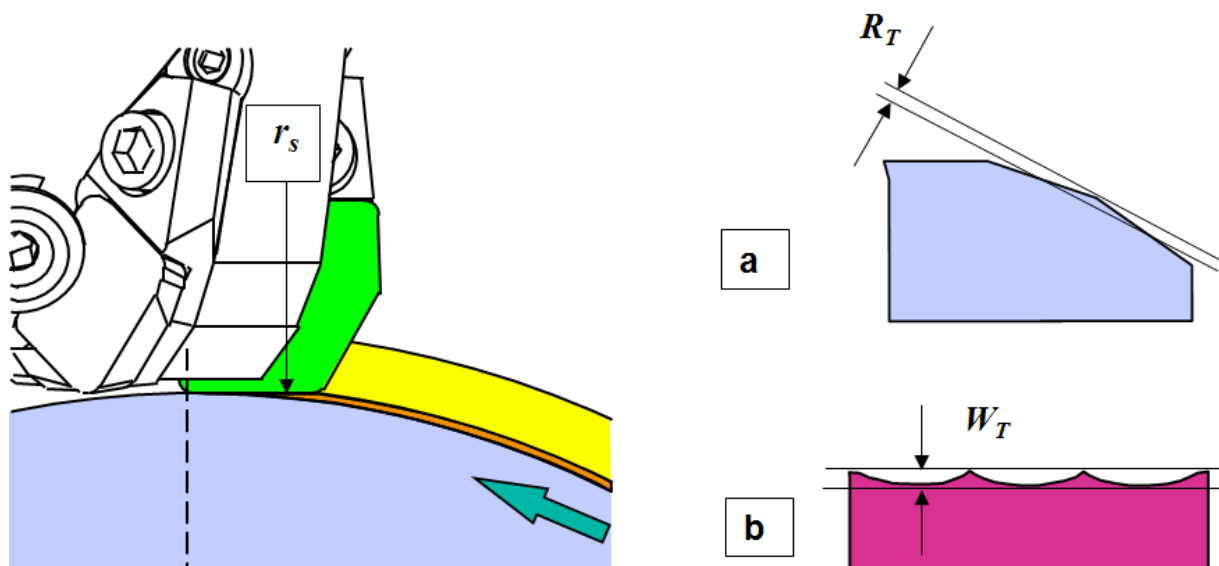
4. GEOMETRIJA OBRAĐENE POVRŠINE

Jedno od prvih saznanja o značajkama procesa obrade ortogonalnim okretnim glodanjem, bilo je da geometrijski oblik obrađene površine bitno ovisi o omjeru frekvencije vrtnje obratka i glodala. Zadovoljavajući rezultati dobiju se kada je $n_g \ll n_o$ ili kada je $n_g \gg n_o$. Kada je $n_g = n_o$, obrada vodi stvaranju velikih faseta na obrađenoj površini a to je, praktično i teorijski, nekorisno [1].

Istraživanjima geometrijskih odstupanja obrađene površine, kada je $n_g < n_o$, bavio se prema dostupnim spoznajama isključivo Sorge i to za slučaj centričnog ortogonalnog okretnog glodanja. Sorge je pronašao mnoge prednosti toga postupka nad tokarenjem, ali taj postupak do sada nije našao primjenu u praksi, iako Sorge tvrdi da to ima velikog smisla. Izgled obrađene površine pri tome je takav da se daje zaključiti da pri $n_g \ll n_o$ proces konvergira tokarenju pri kojemu se periodično, tijekom obrade, mijenjaju u zahvatu s obratkom rezne oštrice. Geometrijsko odstupanje obrađene površine, dakle, smanjuje se kada raste frekvencija vrtnje obratka u odnosu na glodalo, ali i sa povećanjem broja zubi glodala. Pokusna istraživanja obavljena su čak i pri $n_o = 1800 \text{ min}^{-1}$ i $n_g = 14 \text{ min}^{-1}$, dakle, kod vrlo velikog raspona frekvencija vrtnje obratka i glodala. U pokusima varirane su frekvencije vrtnje, ali i dubina obrade i posmična aksijalna brzina. Pri tomu je utvrđeno da dubina obrade bitno ne utječe na rezultat, a aksijalna posmična brzina utjecala je značajno u smislu da je njeno povećanje povećavalo hrapavost obrađene površine. Visine neravnina označavane su sa R_t i varirale su u rasponu od 4 do 20 μm [1].



Slika 4.1. Izgled površine nakon obrade postupkom ortogonalnog okretnog glodanja [11]



Slika 4.2. Shematski prikaz geometrije obrađene površine [1]

a - teorijska visina neravnina (hrapavost- R_T) u poprečnom presjeku obratka

b - teorijska visina neravnina (valovitost- W_T) u uzdužnom presjeku obratka

Većina istraživača bavila se kakvoćom obrađene površine kada je $n_g > n_o$, iz razloga što je taj postupak našao veliku primjenu u praksi i pri čemu su moguće sve varijante ortogonalnog okretnog glodanja prikazane na slici 3.2. Izgled obrađene površine u poprečnom (radijalnom) i uzdužnom (aksijalnom) presjeku obratka prikazan je na slici 4.2.

Na slici 4.2. pokazano je da u poprečnom presjeku obradak ima oblik poligona čiji vrhovi predstavljaju geometrijska odstupanja obrađene površine, odnosno teorijsku visinu neravnina. Pri praktičnoj uporabi ovog postupka rabi se $n_g \gg n_o$ pa su stranice poligona vrlo malih vrijednosti, a visinu neravnina većina istraživača smatra teorijskom hrapavošću (R_T) [1].

Slika 4.2. pokazuje da će se i u uzdužnom (aksijalnom) smjeru obratka pojaviti teorijsko odstupanje geometrije obrađene površine naznačeno kao teorijska valovitost " W_T ". Teorijska valovitost pojavljuje se iz razloga što čeona oštrica rezne pločice nije potpuno ravna linija, već ima polumjer [1]. Polumjer zakrivljenja čeone oštrice " r_s " razlikuje se ovisno o proizvođaču alata i namjeni pločice prema [1], za finu obradu i reznu pločicu od keramike može biti do 1200 mm.



Istraživanja temeljena na kvaliteti obrađene površine dala su određena saznanja o utjecajnim veličinama na geometrijsko odstupanje obrađene površine:

- Hrapavost u radijalnom smjeru je dva do četiri puta veća od hrapavosti u aksijalnom smjeru [6],
- U aksijalnom smjeru pojavljuje se valovitost obrađene površine koja je, osim radijusom čeone oštrice uvjetovana krutošću i točnošću agregata, [1]
- Vibracije koje nastaju kao posljedica značajki obrade glodalom, a koje ovise o krutosti sustava, čiji su sastavni dijelovi glodači agregat, obradak i alatni stroj, značajno povećavaju hrapavost,
- Naročito je važna krutost glodačkog agregata pa se pred njega postavljaju najveći zahtjevi [1][6][8].

U radu [1] objavljeni su rezultati pokusa kojim je utvrđeno da hrapavost obrađene površine bitno ovisi o:

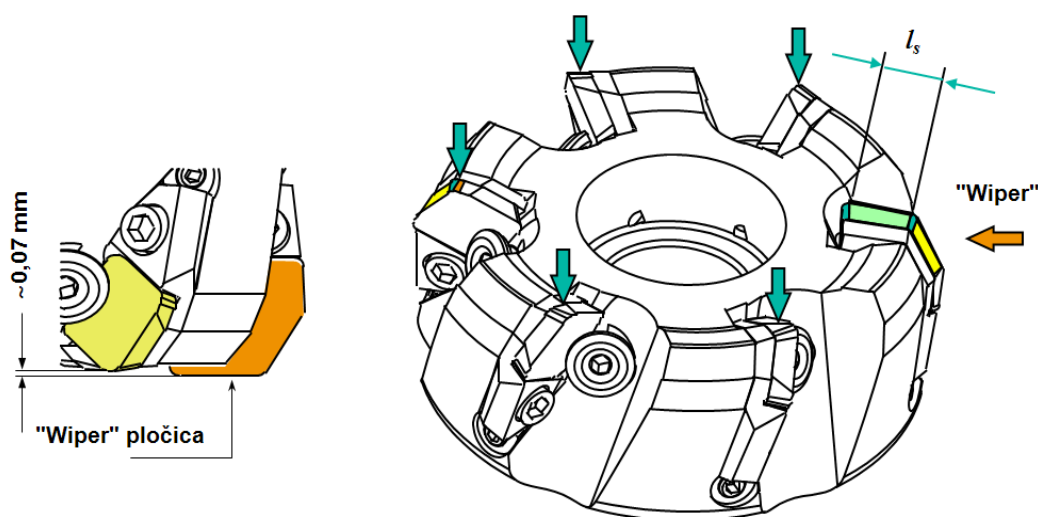
- kutu namještanja čeone oštrice glodala; mora biti $\kappa_r = 0^\circ$.
- planskom udaru glodala,
- kutu nagiba glodaće glave i
- posmaku po zubu glodala.

Također je utvrđeno da, kada se ekscentar "E" poveća na vrijednost $E=Dg/2$ nastaju značajna geometrijska odstupanja obrađene površine u aksijalnom smjeru, valovitost, pa tu varijantu postupka valja izbjegavati.

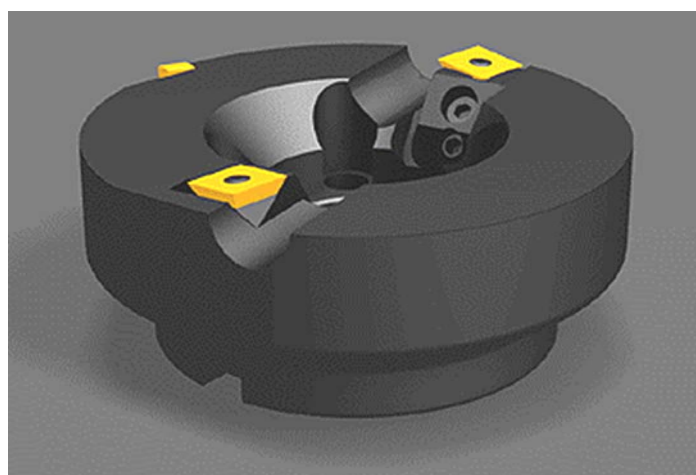
5. REZNI ALATI ZA ORTOGONALNO OKRETNO GLODANJE

Razvoj reznih alata za ortogonalno okretno glodanje započeo je otprilike istodobno kad i razvoju prvih strojeva [1]. Seco Tools razvio je program najvećeg izbora, a glodala su podjeljena u dvije skupine [1][12]:

- glodala iz standardnog programa - pretežno za grubu i srednju obradu, a manjim dijelom za završnu obradu. To su zapravo modificirana glodala za čeono glodanje i upotrebljavaju se kako za ravno tako i za okretno glodanje. Slika 5.1.
- glodala iz specijalnog programa - isključivo za završnu i finu obradu ortogonalnim okretnim glodanjem (slika 5.2.).



Slika 5.1. Glodalo iz standardnog programa za ortogonalno okretnog glodanje [1]



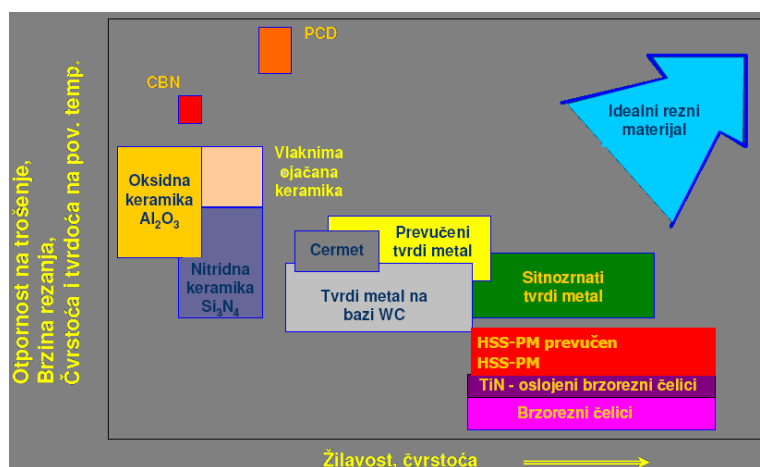
Slika 5.2. Glodalo iz specijalnog programa za finu obradu O.O.G. [1]



Važno je napomenuti da glodalo za ortogonalno okretno glodanje mora imati barem jednu reznu pločicu ("Wiper" pločica) koja ima čeonu reznu oštricu relativno paralelnu s osi obratka ($\kappa_r = 0^\circ$ - slika 5.1.). Kako su ležišta pločica, kao i same pločice, izrađena sa dimenzijama u toleranciji, svako glodalo posjeduje određeni planski udar. Iz tog razloga samo jedna čeonu oštrica u glodalu određuje dimenziju obratka. To znači da upotreba glodala sa više od jedne Wiper pločice ima smisla samo kod glodala sa puno zubi, ili kod glodala koja imaju mogućnost podešavanja položaja pločice u aksijalnom smjeru.

Proces ortogonalnog okretnog glodanja postavlja visoke zahtjeve na rezni alat, naročito na čeonu reznu oštricu. Glodala i vretena glodačkih jedinki moraju biti dobro uravnoteženih masa, sa minimalnim udarima kako bi se minimizirala mogućnost pojave vibracija. Zbog toga se posvećuje osobita pozornost prednamještanju pločica, ili, ako je to moguće, glodala se planski bruse prije uporabe [1]. U radu [1] predstavljeni su rezultati istraživanja utjecaja udara na reznim pločicama na hrapavost obrađene površine. Na površini obratka obrađenoj s glodalom koje je imalo planski udar od $\pm 4 \mu\text{m}$ izmjeren je parametar hrapavosti $R_T = 10\text{-}20 \mu\text{m}$. Na površini obratka obrađenoj sa glodalom koje praktično nije imalo planski udar izmjeren je parametar hrapavosti $R_T = 0,4 \mu\text{m}$.

Sve vrste materijala reznih pločica koje se upotrebljavaju pri klasičnom i visokobrzinskom glodanju, preporučuju se i za ortogonalno okruglo glodanje. Pri tomu se za grubu obradu, dakle obradu velikih snaga, preporučuju pločice od prevučenog tvrdog metala. Rezna keramika preporučuje se pri obradi malim presjecima odvojenih čestica i pri uporabi visokih brzina [1].



Slika 5.3. Prikaz materijala reznih pločica [2]

Obrada velikih koljenastih osovina vršila se koaksijalnim okretnim glodanjem s glodalima promjera i do nekoliko metara. Glodalo sa slike 5.4. je promjera 1.5 m i cijenom oko 130000 eura. Postupak je sve manje u uporabi [11].



Slika 5.4. Glodalo za koaksijalno okretno glodanje [11]

Danas se najčešće koristi postupak ortogonalnog okretnog glodanja. Glodala su puno manjih dimenzija i masa, a obavljaju isti posao u dvostruko kraćem vremenu i znatno nižom cijenom (slika 5.5.) [11].



Slika 5.5. Glodala za ortogonalno okretno glodanje [11]

- a) gruba obrada
- b) fina obrada



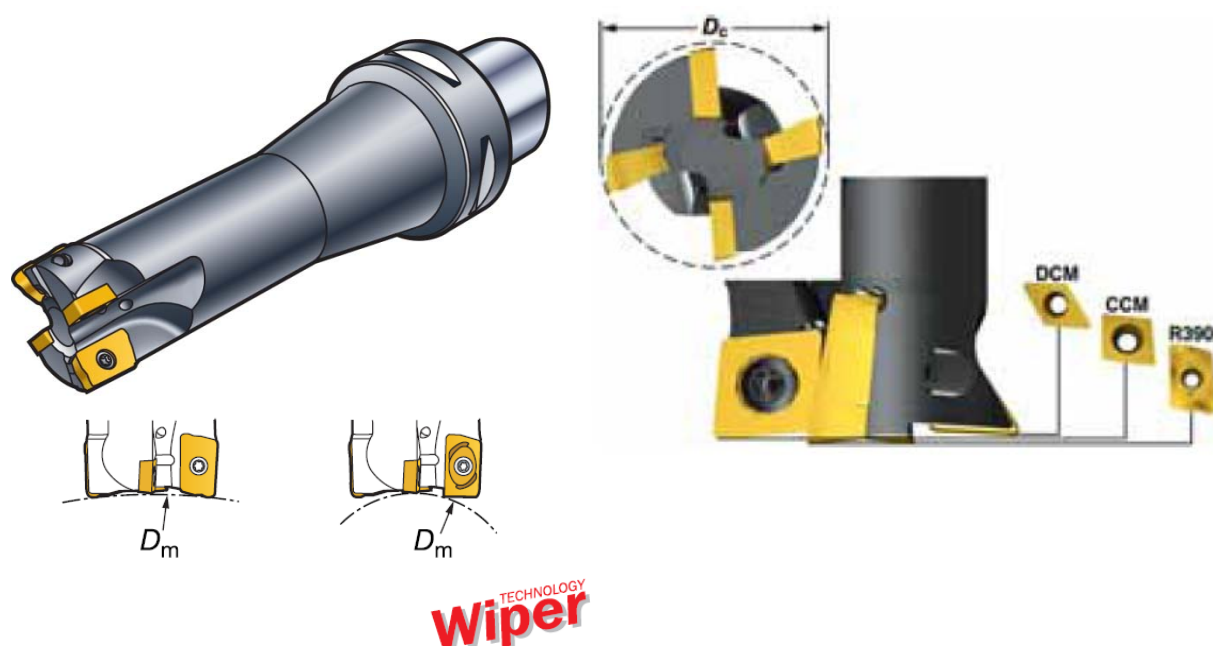
a)

b)

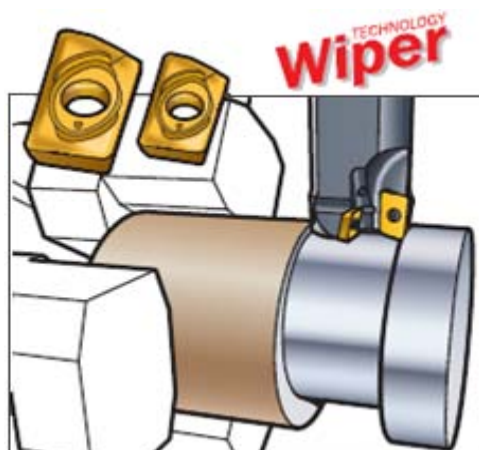
Uz standardna glodala iz programa za ortogonalno okretno glodanje postoje i glodala multifunkcionalne namjene, glodala koja osim okretnog glodanja mogu vršiti i druge operacije (Obavezno umetanje Wiper pločice, ovisno o vrsti obrade). Slijedi prikaz takvog alata i njegove mogućnosti obrade (slika 5.7., i, 5.8.).



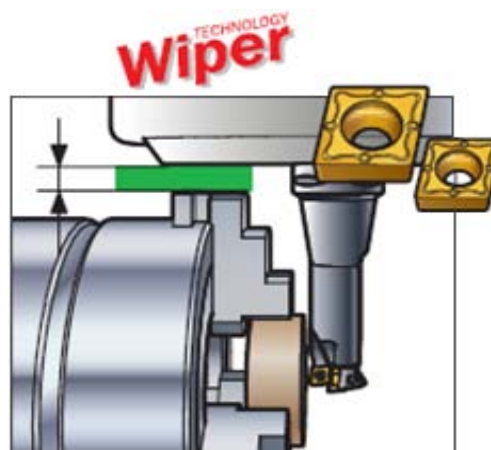
Slika 5.6. Glodala za ortogonalno okretno glodanje proizvođača SECO, sa pločicama od tvrdog metala [13]



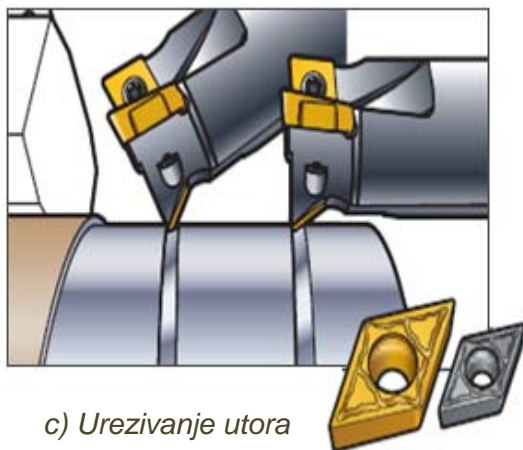
Slika 5.7. Glodalo proizvođača Sandvik Coromant (Tip: CoroMill 390 cutter) [14]



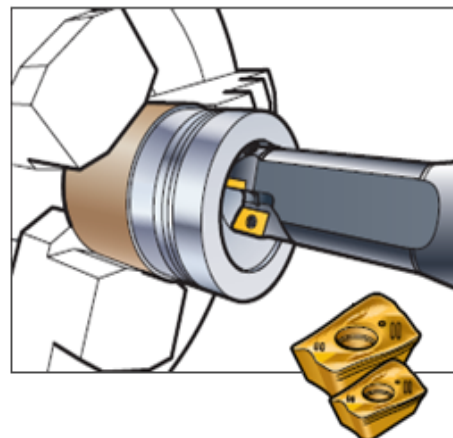
a) Okretno glodanje



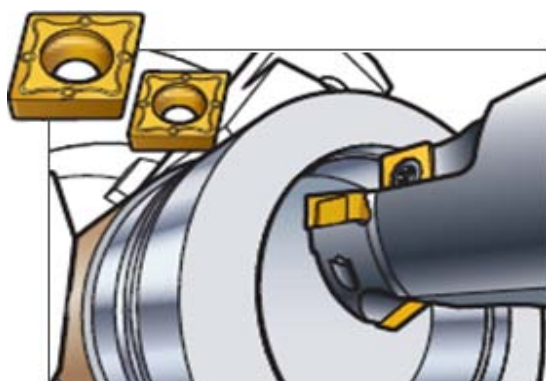
b) Čeono i uzdužno tokarenje



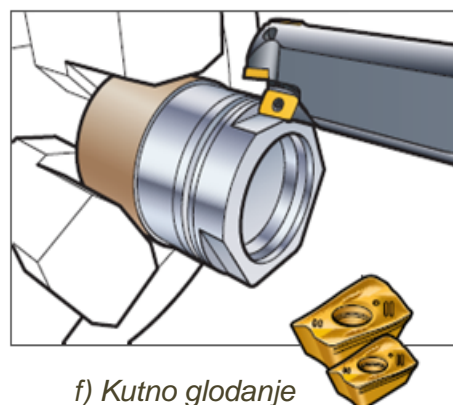
c) Urezivanje utora



d) Koaksijalno glodanje (Circular interpolation in helix)



e) Unutarnje tokarenje



f) Kutno glodanje

Slika 5.8. Prikaz raznih operacija obrade istim alatom [14]



6. ODVOJENA ČESTICA

Složeni kinematski proces ortogonalnog okretnog glodanja ima za posljedicu i vrlo složeni rad rezne oštrice, što rezultira karakterističnim presjekom odvojene čestice, koji se neprestano mijenja tijekom zahvata, odnosno vremena. Uz konstantne sve uvjete obrade presjek odvojene čestice je tako funkcija zahvatnog kuta " φ " za Wiper pločicu. Presjek odvojene čestice, prema slici 3.5., sastoji od dva dijela [1]:

- dijela koji stvara obodna oštrica, obodni odrezak: $A_{ob} = a(\varphi) h_o(\varphi)$,
- dijela koji stvara čeona oštrica, čeoni odrezak: $A_{če} = b_{\check{c}}(\varphi) h_{\check{c}}(\varphi, r)/2$.

Značajke rada rezne oštrice, pa time i oblik odvojene čestice, razlikuju se ovisno o varijanti, odnosno poziciji postupka.

Funkcija oblika odvojene čestice, prema [1][15], definira se volumskim koeficijentom prema izrazu:

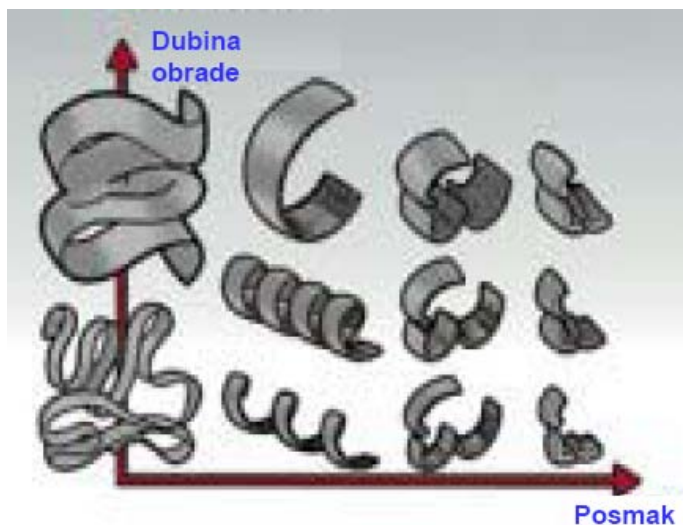
$$k_{o\check{c}} = \frac{V_{o\check{c}}}{V_M} \quad 6.1.$$

$V_{o\check{c}}$ = volumen koji zauzima odvojena čestica

V_M = volumen dijela obratka koji je pretvoren u odvojenu česticu

Odvojene čestice prema obliku i prema volumenu koji zauzimaju klasificirane su prema König W. u 12. grupa, a prema Vul'fu A.M. u 10 grupa.

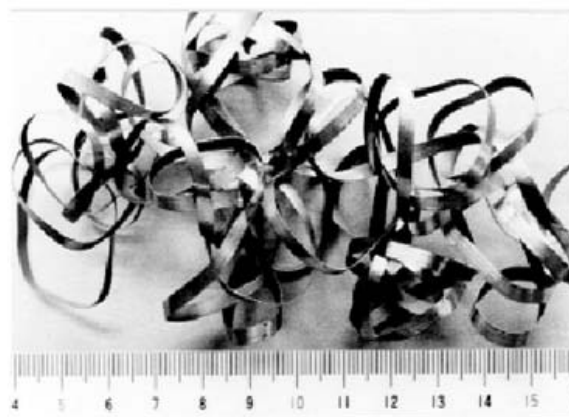
6.1. Izgled odvojene čestice kod tokarenja



Slika 6.1. Oblici odvojenih čestica kod tokarenja [16]



Slika 6.2. Lomljena i segmentna
(nekontinuirana) [2]



Slika 6.3. Kontinuirana
O.O.Č [2]

Odvojena čestica kod tokarenja prema slici 6.1. može imati različite oblike pa je svrstana u četiri grupe [1]:

- nepovoljna - $k_{o\check{c}} = 60 - 400$ (dugi zavoji velikog promjera i duge trake trake),
- prihvatljiva - $k_{o\check{c}} = 45-60$ (dugi zavoji malog promjera),
- pogodna - $k_{o\check{c}} = 10 - 45$ (kratki zavoji i spirale),
- pogodna - $k_{o\check{c}} = 5-10$ (duža i kratka iverasta).

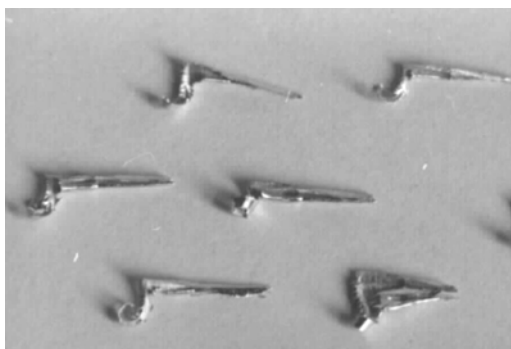
6.2. Izgled odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja

Prema slici 6.4. odvojena čestica kod ortogonalnog okretnog glodanja, po istoj klasifikaciji svrstava se u [1]:

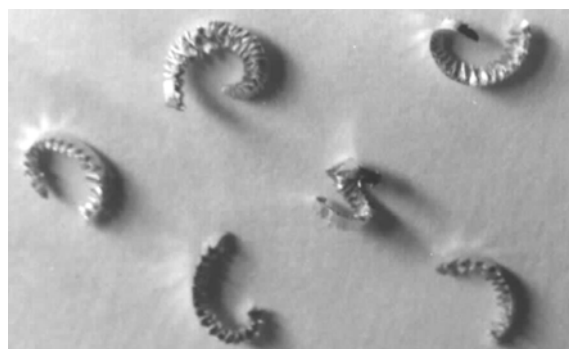
- pogodna - $k_{o\check{c}} = 5 - 10$ (duža i kratka iverasta).

Prema tome indeks pogodnosti je

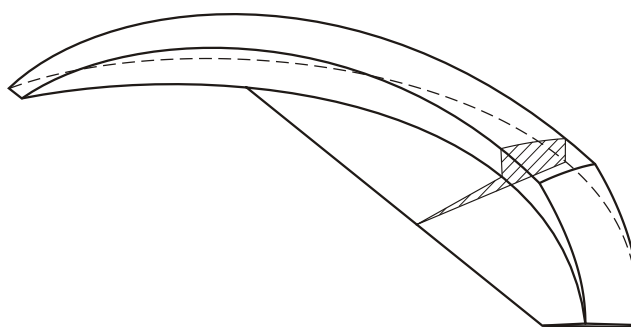
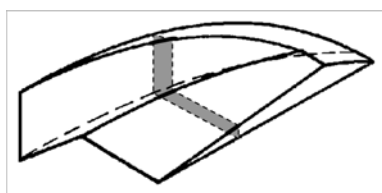
$$I_{p,\check{c}} = \frac{k_{o\check{c},oog}}{k_{o\check{c},tok}} = \frac{5-10}{5-400} \quad 6.2.$$



a)



b)



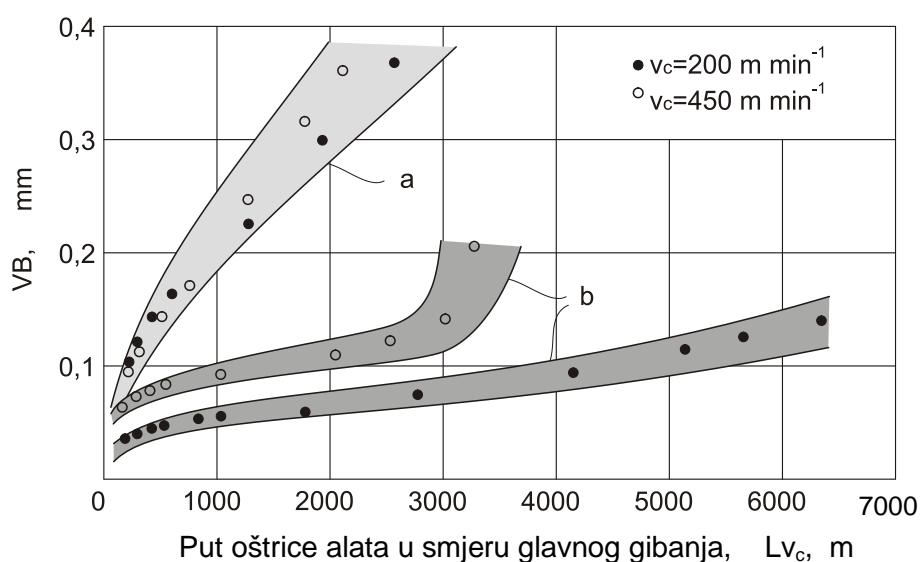
Slika 6.4. Teorijski i stvarni oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja: a) pozicij centar b) pozicija ekscentar [1]

7. POSTOJANOST ALATA KOD ORTOGONALNOG OKRETNOG GLODANJA

Prema objavljenim i predstavljenim istraživanjima daje se zaključiti da utjecaj parametara režima obrade na postojanost alata nije dovoljno istražen, a ni njihov utjecaj nije matematički opisan. U proizvodnji su se uglavnom koriste spoznaje iz područja klasičnog glodanja. Proizvođači alata u smjeru okretnog glodanja nisu objavili istraživanja. To je, vjerojatno i jedan od razloga zbog kojeg do danas nedostaju temeljna istraživanja te relativno nove tehnologije.

Pri obradi tokarenjem glavna oštrica noža je u stalnom kontaktu s obratkom, a dio koji vrši rezanje se ne može izravno hladiti što povećava temperaturu i vodi do ubrzanog trošenja alata [1][17].

Glodalo kod ortogonalnog okretnog glodanja je alat s više oštrica, koje periodički ulaze i izlaze iz zahvata. Prilikom obrade svaka oštrica skida strugotinu poput jednog tokarskog noža. U razdoblju od jednog do drugog zahvata jedne te iste oštrice ona se hladi okolnim zrakom i rashladnim sredstvom pa u novi zahvat ulazi toplinski rasterećena. Sve to omogućava duži vijek trajanja glodala i mogućnost primjene većih brzina rezanja što sigurno povećava i proizvodnost. [1][17].

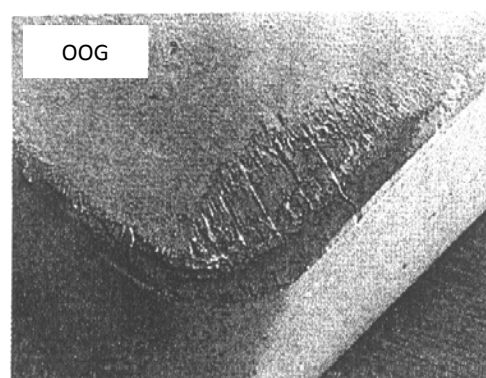
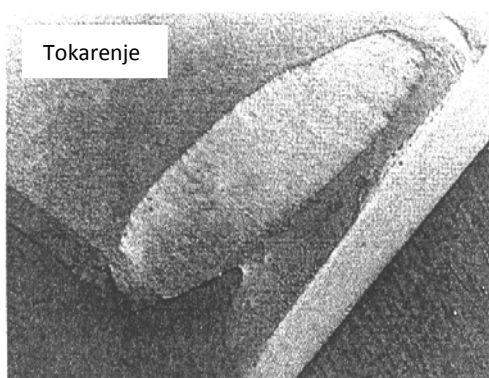


Slika 7.1. Ovisnost istrošenja stražnje površine alata o duljini obrade jedne oštrice u smjeru glavnog gibanja [1]

U radu [1] autor predstavlja rezultate dobivenene komparativnim istraživanjem trošenja alata kod tokarenja i ortogonalnog okretnog glodanja, (pozicija ekscentar), pri istim uvjetima obrade. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 2. i slikom 7.2.

	Tokarenje	O.O.G. - ekscentrično
Obradak	Ck45N, $D_0 = 140$ mm	
Uvjeti obrade	$v_c = 180 \text{ mmin}^{-1}$ $f = 0,32 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$	$v_c = 194 \text{ mmin}^{-1}$ $f_2 = 0,31 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $D_g = 315 \text{ mm}$ $Z_g = 1$
Alat	Tvrđi metal P 25 + prevlaka TiN	
	$\gamma = 5^\circ$ $\alpha = 6^\circ$	$\gamma_{ob} = 0^\circ$, $\gamma_{če} = 5^\circ$, $\alpha = 6^\circ$
Specifični volumen odvojenih čestica	$115 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$	$236 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$
Istrošenje alata pri $T = 19 \text{ min}$	Potpuno istrošenje	Djelomično pucanje prevlake

Tablica 2. Istrošenost alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okretnim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [1]



Slika 7.2. Istrošenost alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okretnim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [1]



8. PROIZVODNOST POSTUPKA OBRADE

Proizvodnost postupka obrade uobičajeno je iskazati kroz glavno vrijeme obrade, potrebno za obradu duljine neke površine u smjeru posmičnog puta alata.

8.1. Proizvodnost kod tokarenja

Vrijeme obrade kod tokarenja računa se prema formuli:

$$t_{g,tok} = \frac{L_f}{v_{fax}} = \frac{L_f}{n_o f} \frac{D_o \pi L_f}{v_c f} \quad 8.1.$$

8.2. Proizvodnost kod ortogonalnog okretnog glodanja

S gledišta proizvodnosti najuspješnija varijanta ortogonalnog okretnog glodanja je pozicija ekscentar, za maksimalni osni razmak D_{ak} , u odnosu na centrično ortogonalno okretno glodanje, maksimalni aksijalni posmak tada može biti veći nekoliko puta, a ovisi o duljini čeone oštrice.

Vrijeme obrade kod pozicije ekscentar računa se prema formuli:

$$t_{g,og} = \frac{L_f}{v_{fax}} = \frac{L_f}{n_o f_{ax}} \quad 8.2.$$

Ovdje je Frekvencija vrtnje obratka izvedena veličina i računa se na sljedeći način:

$$n_o = \frac{f_z n_g z_g}{D_o \pi} = \frac{f_z v_c z_g}{D_o \pi^2 D_g} \quad 8.3.$$

Spajanjem prethodna dva izraza dobije se vrijeme obrade za poziciju ekscentar:

$$t_{g,og} = \frac{D_o \pi^2 D_g L_f}{v_c f_{ax} f_z z_g} \quad 8.4.$$

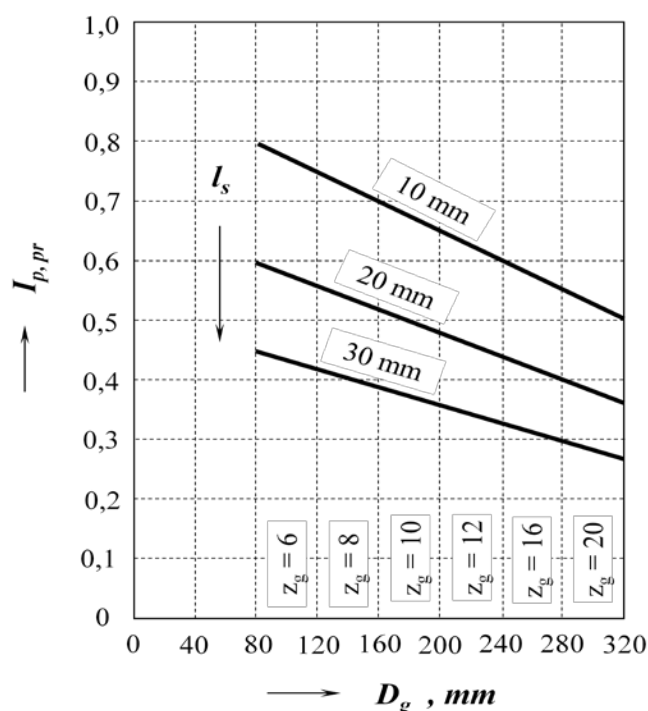
Ako se vremena obrade kod ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja i tokarenja stave u međusoban omjer dobije se indeks pogodnosti:

$$I_{p,prod} = \frac{t_{g,og}}{t_{g,tok}} = \frac{v_{c,tok} f}{v_{c,og} f_z} \frac{D_g \pi}{f_{ax} z_g} \quad 8.5.$$

Ako se primjene iste brzine i isti posmaci po oštrici, vrijedi izraz:

$$I_{p, \text{proizv}} = \frac{D_g \pi}{f_{ax} z_g} \quad 8.6.$$

$$f_{ax, \text{max}} = 2 \sqrt{\left(R_g - r_\varepsilon \tan \frac{\kappa_r}{2} \right)^2 - E + \frac{f_z \cos \eta}{2}} \quad 8.7.$$



Slika 8.1. Indeks pogodnosti za proizvodnost ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja i tokarenja [1]

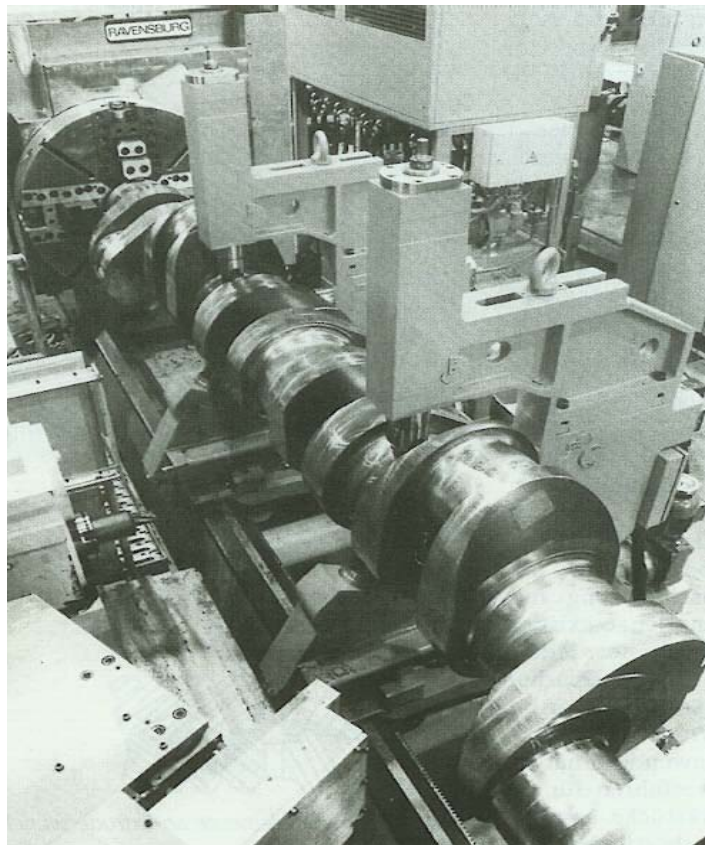
Indeks pogodnosti prema izrazu 8.6. je funkcija veličine glodala, broja zubi glodala i aksijalnog posmaka glodala. Izračun aksijalnog posmaka glodala vrši se prema izrazu 8.7. Dijagram na slici 8.1. grafički je prikaz izraza 8.6. i pokazuje da je indeks pogodnosti, za iste brzine rezanja i iste posmake obrade, za $D_g > 80$ mm, uvijek manji od jedan te da u određenim slučajevima može biti i do 0.27. To govori o većoj proizvodnosti ortogonalnog okretnog glodanja u odnosu na tokarenje, čak i do 3,7 puta. Iz izraza 8.5. se vidi još veće povećanje proizvodnosti kod obradaka većih dimenzija i neuravnoteženih masa, jer se kod tokarenja moraju upotrijebiti nekoliko puta manje brzine rezanja nego kod ortogonalnog okretnog glodanja.



9. PRIMJENA I STROJEVI

Analizom objavljenih radova provedenih istraživanja procesa ortogonalnog okretnog glodanja, uočava se da je, nakon razvoja osnovnih pojmova i značajki postupka, naglasak dan na razvoj strojeva. Željelo se odmah postupak primijeniti na proizvodnju glomaznih obradaka neuravnoteženih masa i na taj način bitno povećati produktivnost njihove proizvodnje. Naročito se postupak pokazao pogodnim kod obrade plastičnih materijala koji pri tokarenju stvaraju duge zavoje i spirale odvojenih čestica koje na automatima, CNC strojevima i obradnim centrima, stvaraju osobite probleme. Također se pokazalo pogodno kod dugih obradaka, osobito pri obradi kore od valjanja, lijevanja i kovanja. Tvrdi kora, osobito velikih promjera, onemogućava uporabu optimalnih brzina rezanja kod tokarenja pa je pogodna za obradu glodalom. Kod obrade obradaka sa ovalnim (neokruglim) površinama te ekscentara, također se pokazalo pogodnije primijeniti okretno glodanje [1]. Sve više danas ortogonalno okretno glodanje koristi se kod obrade obradaka komplicirane geometrije i neuravnoteženih masa: za stalne trapove zrakoplova i automobila, elemenata pogonskih mehanizama strojeva za papir, čeličnih valjaka u energetske industriji (turbinske armature), elementi strojeva za plastiku (vijčani elementi), koljenaste osovine. Autori u radu [1] objašnjavaju i prikazuju kako je, pomoću ortogonalnog okretnog glodanja, moguće proizvesti osovine s različitim promjerima, osovine konstantnog promjera, pužne vijke, kugle i elipsoide.

Slika 9.1. i 9.2. prikazuje obradu koljenastih osovina ortogonalnim okretnim glodanjem i to s dvije glodače jedinice. Simultanim upravljanjem u više osi moguće je izraditi elipsoide najveće preciznosti [1].

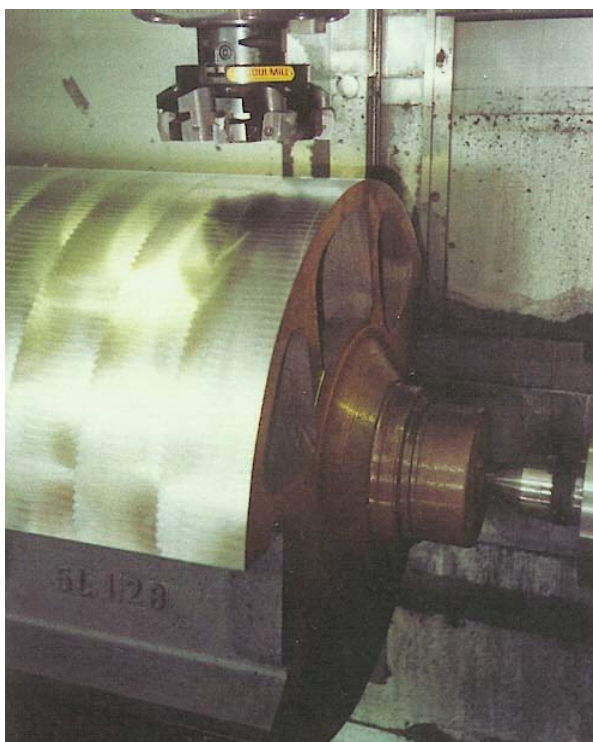


Slika 9.1. Obrada koljenaste osovine ortogonalnim okretnim glodanjem [1]

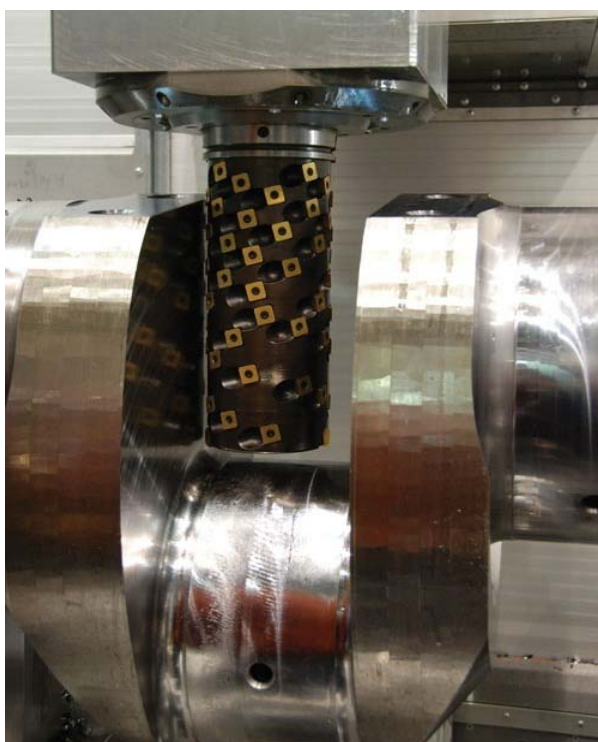


Slika 9.2. Obrada koljenaste osovine CNC obradnim centrom [18]

Na slici 9.3. prikazana je gruba obrada tlačnog cilindra od sivog lijeva legiranog kromom, promjera 618 mm, kao tipični obradak velike dužine i neuravnoteženih masa, uspješno obrađen ortogonalnim okretnim glodanjem. Risovi po površini obratka, nakon fine obrade, nastali uslijed velikog aksijalnog posmaka ostavljaju dojam grube površine, no, radi se o optičkoj varci, jer je obrađena površina u granicama tražene hrapavosti (reda μm) [1].

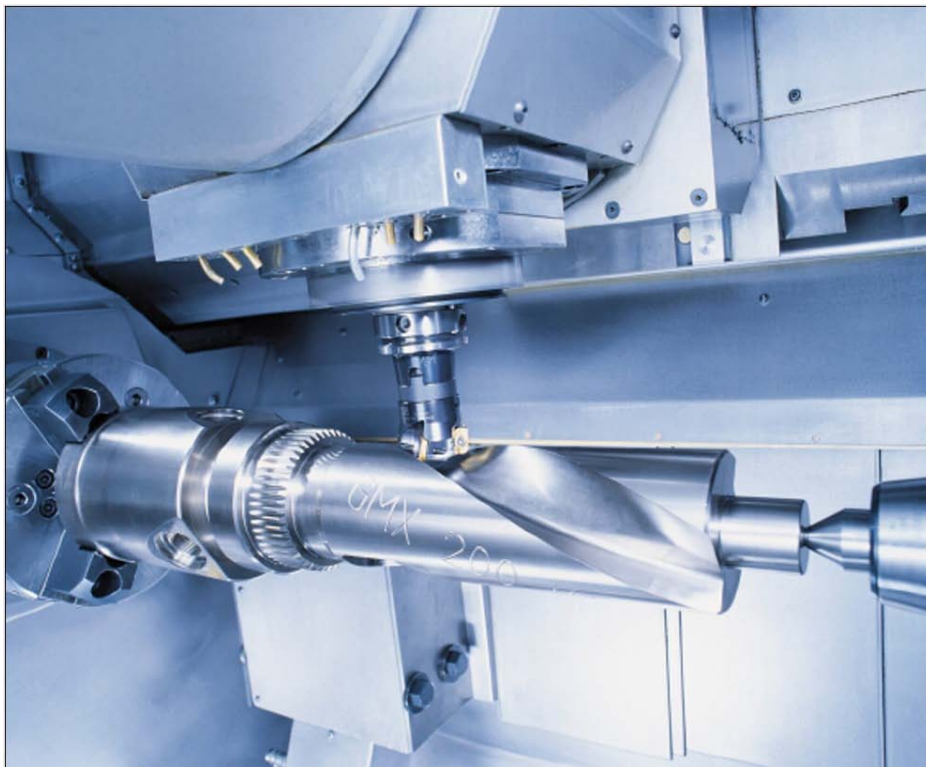


Slika 9.3. Gruba obrada tlačnog cilindra [1].



Slika 9.4. Gruba obrada koljenaste osovine [19].

Slike 9.4., 9.5., 9.6. su također predstavnici obrade obradaka okretnim glodanjem, komplicirane geometrije i neuravnoteženih masa. Ujedno pokazuju da ovakve vrste obradaka gotovo i nije moguće izvesti bez primjene metode okretnog glodanja te numerički upravljanih strojeva.



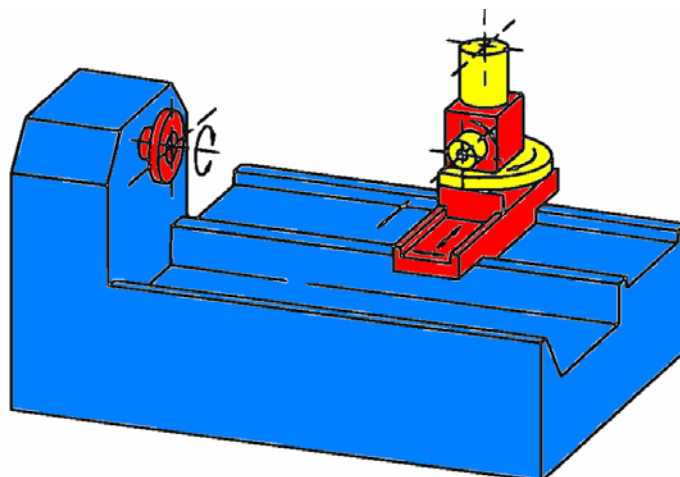
Slika 9.5. Glodanje zavojnice [19]



Slika 9.6. Glodanje osovine različitih promjera [19]

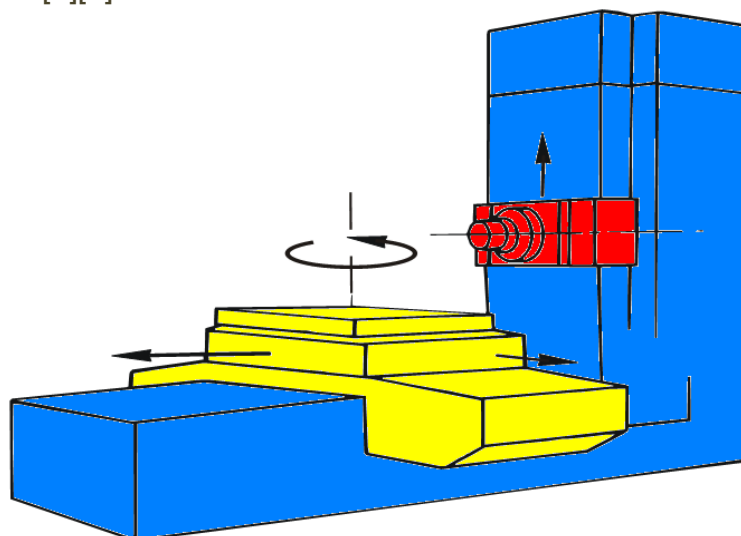


Primjena ortogonalnog okretnog glodanja zahtijevala je razvoj novih obradnih strojeva. Najjednostavniji oblik takvog stroja dobije se kada se na suport tokarilice ugradi glodača jedinka sa zasebnim pogonom (slika 9.7.). Po tom principu napravljen je stroj početkom osamdesetih godina na Visokoj tehničkoj školi u Darmstadtu i to iz kopirne tokarilice [1]. Stroj je prvenstveno služio za pokuse kod ortogonalnog okretnog glodanja kada je $n_g < n_o$. Rezultati tih istraživanja prezentirani su u radu [1].



Slika 9.7. Tokarski stroj preuređen za ortogonalno okretno glodanje [1]

Ortogonalno okretno glodanje moguće je ostvariti i na glodalici, te na obradnom centru, kako to prikazuje slika 9.8. [1]. Kako je to prikazano na slikama 9.7. i 9.8. potrebno je da stroj ima mogućnost upravljanja u barem četiri osi, od kojih jedna mora biti rotacijska, a poželjno je da ima mogućnost upravljanja u pet osi [1]. Osim toga vrlo visoki zahtjevi postavljaju se na krutost sustava, a posebno na krutost glodaćeg agregata [1][8].

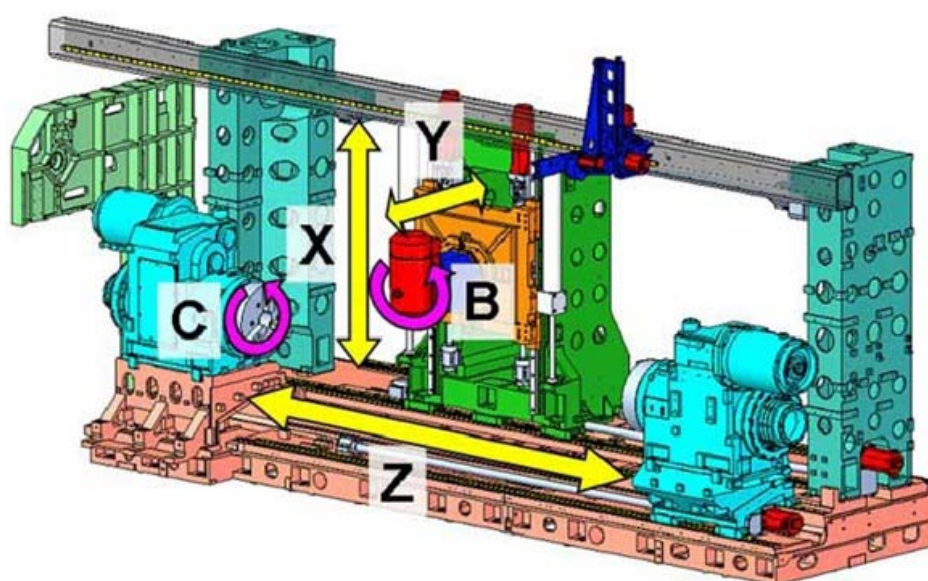


Slika 9.8. Ortogonalno okretno glodanje na CNC glodalici [1]

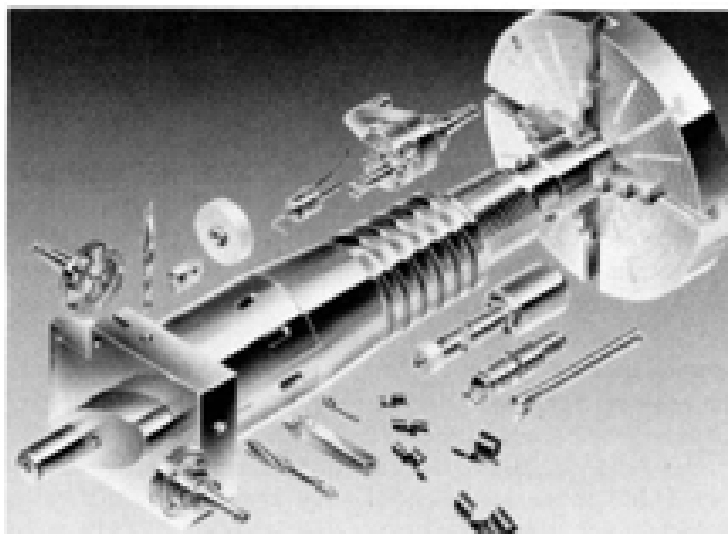
Nove koncepcije alatnih strojeva, čiji razvoj je uvjetovan primjenom CNC tehnologije i modularne gradnje, s jedne strane, te principima nove proizvodne filozofije, s druge strane, sažimaju tehnike obrade više konvencionalnih strojeva. One omogućuju obradu okretnim glodanjem, ali i obradu tokarenjem, glodanjem, bušenjem, izradu navoja itd., odnosno omogućavaju primjenu više vrsta operacija u jednom stezanju, do kompletne obrade obratka. Radi se, dakle, prvenstveno o obradnim centrima više ili manje prilagođenim glavnim značajkama obratka. Slika 9.9. prikazuje jedan takav stroj, a slika 9.11. prikazuje obradak izrađen na takvom stroju. Kako je razvoj i primjena fleksibilnih obrednih sustava jedan od osnovnih elemenata nove proizvodne filozofije, a obradni centri su osnovni elementi fleksibilnih obradnih sustava, to je, očito, ortogonalno okretno glodanje veliki prilog novoj proizvodnoj filozofiji [1].



Slika 9.9. CNC obradni centar proizvođača Mori Seiki [20]

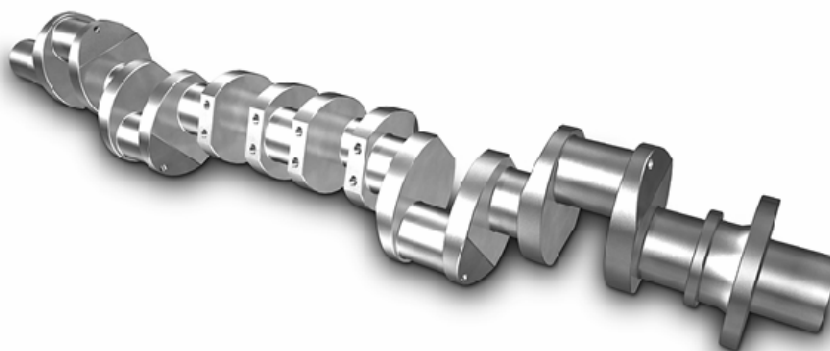


Slika 9.10. Prikaz glavnih i pomoćnih osi stroja sa slike 9.9. [20]



Slika 9.11. Primjer kompletne obrade na CNC obradnom centru [1]

Osobitu pozornost privlači obrada obradaka velikih, neokruglih, a naročito ekscentričnih masa iz dva razloga. Prvi je što se takvi obratci ne mogu okretati visokim frekvencijama vrtnje pa se ne mogu optimalizirati procesi. Ortogonalnim okretnim glodanjem glavno gibanje prenosi se na alat pa je optimalizacija moguća. Drugi razlog je što se kompletnom obradom na jednom stroju štedi na transportu, međuskladištenju, ponovnom stezanju i centriranju obratka, što sve znatno utječe na skraćanje ciklusa proizvodnje, a onda i na znatno veći koeficijent obrtaja kapitala [1].



Slika 9.12. Glomazna koljenasta osovina izrađena ortogonalnim okretnim glodanjem [20]



10. ZAKLJUČAK

Ortogonalno okretno glodanje jedan je od relativno novijih postupaka obrade odvajanjem čestica. Iako se u praksi primjenjuje već više godina, doduše u ograničenom opsegu, taj postupak, uz značajne prednosti nad drugim postupcima obrade odvajanjem, prvenstveno tokarenjem, nije još sustavno u potpunosti istražen.

Glavni temelji današnje proizvodne filozofije su proizvodnost, ekonomičnost i kakvoća proizvoda. U nastojanju realizacije zadanog cilja svi čimbenici imaju vrlo dinamičan i međusobno uvjetovan, interaktivan razvoj. U takvim uvjetima pred obradne sustave i metode obrade postavljaju se visoki zahtjevi.

Postupak ortogonalnog okretnog glodanja je u ovom radu prikazan glavnim i temeljnim istraženim spoznajama koje su predstavljene u devet cjelina, kroz koje se pokušava pokazati važnost daljnjeg istraživanja i razvoja ovog postupka obrade.

Ortogonalno okretno glodanje se najčešće uspoređuje sa tokarenjem i pokušava zamijeniti tokarenje gdje god je to moguće. Postupak je teorijski analiziran i razrađen, čime su sagledane osnovne teorijske tehnološke zakonitosti postupka ortogonalnog okretnog glodanja. Usporedbom tokarenja i ortogonalnog okretnog glodanja pokazane su glavne prednosti postupka ortogonalnog okretnog glodanja nad navedenim u pogledu geometrije obrađene površine, postojanosti alata, proizvodnosti samog postupka obrade te obrade obradaka komplicirane geometrije. Iako je potrebno provoditi znatno složenija i vrlo opsežna istraživanja, uz značajne prednosti, na strani nove proizvodne filozofije, nad tokarenjem postupak ima smisla sustavno istraživati i analizirati i time potaknuti njegovu širu primjenu.



11. LITERATURA

- [1] Škorić S.: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Disertacija, FSB Zagreb 2002
- [2] <http://www.fsb.hr/kas>
- [3] [www.cncturkey.com/images/turning_ sm..](http://www.cncturkey.com/images/turning_sm..)
- [4] [www.cncturkey.com/images/milling_ sm..](http://www.cncturkey.com/images/milling_sm..)
- [5] <http://www.fesb.hr.:> Tokarsko glodanje. pdf
- [6] Pogačnik M.: Vstopno izstopne razmere pri visokohitrostnem čelnem stružilnem frezanju, Disertacija, Ljubljana 1997
- [7] Cebalo R, Ištef I.: Petoosno glodanje; teorija i primjena, 2. međunarodno savjetovanje proizvodnog strojarstva CIM 93, Zagreb 1993.
- [8] Kopač J., Dolinšek S., Pogačnik M.: Turn milling dynamics and "rts influence on machining surface quality, 25th CIRP International Seminar Bled 1993.
- [9] Kopač J., Pogačnik M.: Theoretical Basis and Practicall Applicability of Turnmilling, Strojarstvo 38(4,5) 1996 strana 171.-174.
- [10] Kopač J., Pogačnik M.: Vibration Influence on Trun milling Process, 27th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 1995. Ann Arbor, Michigan, USA, f. p. 375, 7.
- [11] 212.209.32.244/upload/international/library/newedge/en0298.pdf
- [12] [http://www.secotools.de/Produkte/M_Navig/Fraesen_2000. pdf](http://www.secotools.de/Produkte/M_Navig/Fraesen_2000.pdf)
- [13] www.secotools.com
- [14] www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/...20052/020-027.pdf
- [15] Stanić J.: Teorija obrade metala, Mašinski fakultet, Beograd 1986.
- [16] Sandvik Coromant: Modern Metal Cutting - a practical handbook, Sandvik Coromant, Tehnical Editorial dept., Sandviken 1994.
- [17] Schulz H., Spur C: High speed turn milling. A new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces, Annals ofthe CIRP Vol. 39/1/90, p. 107.
- [18] www.energy-machine.com/
- [19] www.mmsonline.com
- [20] www.moriseiki.com/english/news/pdf/2008_0423_nt6600.pdf